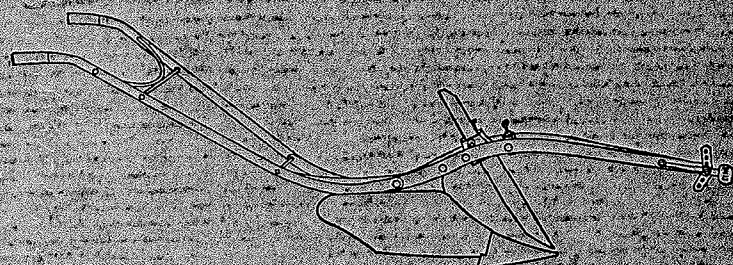


Lantbrukshögskolan
UPPSALA

RAPPORTER FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Agricultural College of Sweden, 750 07 Uppsala 7
Reports from the Division of Soil Management



NR 18

Mars 1969

Göte Bertilsson:
STUDIER ÖVER TRYCKETS
MARKPÅVERKAN

Rättelser

Göte Bertilsson: Studier över tryckets markpåverkan. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, nr 18 1969.

- Sid. 2. Rad 11 nedifrån ... medgav en variabel men bestämd ...
- Sid. 6. 1:a stycket, 4:e raden nedifrån: "Före" skall vara "Efter".
- Sid. 7. 3:e styckets sista rad: "tabell 2" skall vara "tabell 1".
- Sid. 8. 2:e raden nedifrån skall tilläggas: "se tabell 3".
- Sid. 8. Sista raden står "av Fiedler", skall vara "enligt Fiedler".
- Sid. 9. Cyl. nr 166, delen "över mitt" har volymvikten 1,62.
- Sid. 12. 2:a stycket, rad 5 "(se bilaga)", skall vara "se sid. 6, Provtagning och behandling."
- Sid. 18. 3:e styckets 6:e rad: "(diagram 34 och 35)", skall vara "(diagram 35 och 36)".
- Sid. 19. 2:a stycket, rad 12: Befuktningen skedde med vattentillsats (pipett) direkt i cylindern.
- Sid. 19. Tabell 6 A: Avsugningen utfördes på avsugningsbädd. Tid minst 3 dygn.
- Sid. 20. 2:a styckets 2:a rad: "(Avsnitt A)", skall vara "(Avsnitt B)".
På rad 4 i samma stycke skall stå "6B" istället för "2".
- Sid. 22. Figur 5 är fritt efter Day & Holmgren.
- Sid. 24. Rad 4 - 5: ... den bärande ytan ökar och därmed bärförmågan.

Studier över tryckets markpåverkan

av

Agr. Göte Bertilsson

Innehåll

1. Inledning
2. Metodik och undersökningsmaterial
3. Beräkningsmetoder och sätt för redovisning av resultaten
 - 3.1. Metodens allmängiltighet
4. Resultat
 - 4.1. Sambandet mellan uppnådd volymvikt och fuktighetsförhållandena
 - 4.1.1. Allmänna tendenser
 - 4.1.2. Enskilda lokaler
 - 4.1.3. Jämförelser mellan jordarter och lokaler
 - 4.2. Sambandet mellan volymvikt och pålagt tryck
 - 4.3. Strukturens inverkan på packningsbenägenheten
 - 4.4. Mullhaltens inverkan på packningsbenägenheten
 - 4.5. Biologisk stabiliserings inverkan på packningsbenägenheten
5. Modell för packningsförloppet i en aggregerad plastisk jord
6. Modellens tillämpning i fält
7. Sammanfattning
8. Litteraturförteckning
9. Diagram
 - Diagram 1-4: Resultat av kompressionsprov, provproppar i fält
 - Diagram 5-8: Volymvikt efter kompression som funktion av vattenhalten
 - Diagram 9-32: Sambandet mellan tryck och volymvikt
 - Diagram 33: Inverkan av upprepade belastningar
 - Diagram 34: Sambandet mellan tryck och volymvikt, kompressionskurvans olika delar
 - Diagram 35-36: Sambandet mellan tryck och volymvikt vid olika mullhalt
 - Diagram 37: Biologisk stabilisering

1. Inledning

I vårt mekaniserade jordbruk belastas åkermarken ofta flera gånger årligen av traktorer och andra tunga jordbruksmaskiner. Belastningen orsakar ett tryck i marken, och under inverkan av detta tryck tenderar jorden att sammanpackas. Packning betyder att porositeten minskar. Jordens fysikaliska egenskaper ändras genom packningen. Jorden blir tätare, mer svårbearbetad och mindre genomsläpplig. En måttlig packning kan vara fördelaktig, särskilt under torra betingelser, men oftast är packningen skadlig och ger besvärligare brukningsförhållanden och sämre skördar. Strukturskador till följd av maskindrift är ett av de stora problemen inom det moderna jordbruket.

Frågan om hur ett pålagt tryck påverkar marken har studerats på många håll, och intresset har ökat alltefter som jordbruksdriften mekaniserats. Bland viktiga arbeten av principiell natur kan nämnas Proctor (1933), Söhne (1952), Day & Holmgren (1952), Reaves & Nichols (1955), M.G. Bekker (1956) och Hovanesian & Buchele (1959). Allmänt kan sägas, att man förutom praktiska erfarenheter som gäller för den studerade lokalen eller jordtypen kommit en bit på väg i sökandet efter någorlunda allmängiltiga kvantitativa samband mellan tryck och markpåverkan, som kan tillämpas på åkerjord. Frågan har angripits från två olika utgångspunkter. Sålunda har M.G. Bekker och medarbetare studerat förloppet i markprofilen som helhet. Markytan har belastats, den belastade ytans nedsjunkning har uppmätts och sambandet mellan tryck, nedsjunkning och vissa markparametrar har bestämts. Betraktelsesättet och mätmetoderna har framsprungit inom bärighetsforskningen, där man är mest intresserad av vad som händer med markytan. Naturligtvis är dock markytans reaktion en måttstock på vad som sker även längre ned i profilen, och man har här en utgångspunkt given för vidare studier över hur trycket påverkar marken. Ett annat sätt är att studera reaktionen hos det enskilda volyms-elementet jord, och huvuddelen av forskningen inom området har ägnats denna linje. Jord, lös eller i naturlig lagring, har tagits in i laboratoriet, utsatts för tryck på ett eller annat sätt, och korresponderande värden på tryck och porositet eller andra markparametrar har uppmätts. Målet har varit att erhålla ett samband mellan tryck och t.ex. porositet. Med kännedom om vilket tryck en maskin ger i ett visst lager av markprofilen, skulle man sedan kunna beräkna hur detta lager påverkas av körningen. Det slutliga målet är i båda fallen att förutsäga hur en jordprofil, matjord och alv, påverkas i olika lager av en bestämd belastning. Huvuduppgiften var från början att följa hur jordens packningsbenägenhet förändrades under upptorkningsförloppet på våren. Härför uttogs provproppar i fält för kompressionsprov på laboratoriet. Laboratoriemetoden medgav en variabel med bestämd, reproducerbar belastning. Provpropparna uttogs på traktorpackningsförsök vilket dels gav en möjlighet att relatera laboratorieprovet till traktorpackning i fält och dels gjorde att olika strukturtillstånd hos samma jord blev representerade i undersökningen. 4 provplatser i Uppland undersöktes. Jordarten varierade från lering mo till styv lera.

Fältarbetet uppföljdes sedan med mer utpräglade laboratoriestudier. Kompressionsprov utfördes på bestämda aggregatfraktioner och försök gjordes att bestämma

sambandet mellan porositet och pålagt tryck samt packningsbenägenhetens beroende av jordens vattenhalt, struktur, mullhalt och biologiska aktivitet. Det bakomliggande materialet beträffande inverkan av struktur, mullhalt och biologisk aktivitet är ganska litet och undersökningen får särskilt i dessa avsnitt helt betraktas som orienterande.

I denna undersökning studerades tryckets markpåverkan såväl i fältundersökningar som på laboratoriet. Undersökningen baserar sig på ett examensarbete i ämnet jordbearbetning 1965 och fortsatta undersökningar under 1966. Jag vill varmt tacka agronom Peter Edling för ovärderlig hjälp med slutjusteringen av manuskriptet.

2. Metodik och undersökningsmaterial.

Vid undersökningen användes ett s.k. "confined compression test", vilket innebär att jordprovet under tryckningen hölls inneslutet, så att det ej kunde expandera åt sidorna. Ett jordprov i en stålcylander sammanpressades med en kolv som täckte cylinderns ändyta. Korresponderande värden på tryck och jordprovets volym bestämdes. Ur provets volym kan lätt volymvikt och med kännedom om det fasta jordmaterialets specifika vikt även porositet framräknas (se ett senare avsnitt). Sammanpressningen utfördes först i en apparat av hävstångstyp, där trycket kunde varieras mellan 0 och 2 kp/cm^2 (fig. 1). Senare användes även en hållfasthetsprovare, i vilken jordprovet maskinellt sammanpressades med en bestämd hastighet och tryckkraften mot kolven kontinuerligt registrerades på ett diagram (fig. 2). På diagrammet erhöles alltså tryckkraften som funktion av det cylinderformade provets höjd. Dessa värden kan lätt omräknas till tryck - volymvikt, och diagram av den senare typen användes i denna framställning.

Cylindrarna som användes var vanliga provtagningscylindrar av rostfritt stål. Data: volym 100 cm^3 , diameter 59,0 mm, höjd 36,6 mm. Med dessa kunde provproppar i naturlig lagring uttagas i fält och tryckprov utföras direkt i provtagningscylindern. Samma cylindrar kunde också på laboratoriet fyllas med lös jord eller speciellt preparerad jord för tryckprov. Tryckkolven hade en diameter av 55,0 mm. Mellan kolv och cylindervägg fanns alltså ett spelrum på 2 mm, för att störande friktion mot cylinderväggen i möjligaste mån skulle undvikas.

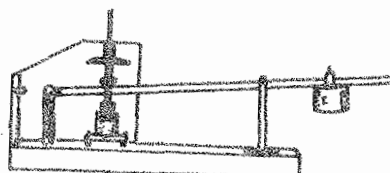
Vid tryckning med hävstångsapparaten avlästes provets kompression efter belastningstiden 30 sek. Efter denna tid var kompressionsförloppet i huvudsak avslutat.

Provplatserna utgjordes av fyra traktorpackningsförsök i Uppland:

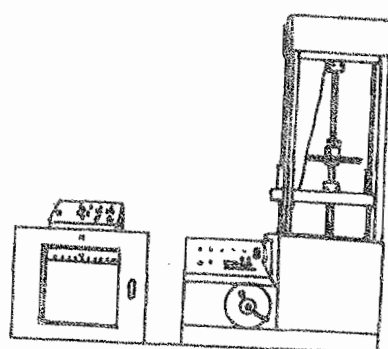
Tre vårpackningsförsök: Lilla Sunnersta, nedre försöket
Lilla Sunnersta, övre försöket
Säby, packnings- och såtidsförsök

Ett höstpackningsförsök: Bredängen, Tierp

Vårpackningsförsöken ingår som ett led i agr. Lennart Fergedals undersökningar av packningens inverkan på grödan.



Figur 1. Tryckapparat av hävstångstyp



Figur 2. Hållfasthetsprovare

Beskrivning av försök och försöksplatser

Lilla Sunnersta

Jordarter: Måttligt mullhaltig styv lera (nedre försöket)
Något mullhaltig lätt mellanlera (övre försöket).

Försöksplan:

- a. Fräsning
- b. Ej körning, endast harvning före sådd
- c. Packning med traktor strax före sådd
- d. Medeltidig packning
- E. Tidig packning
- f. Packning strax efter sådd

Packningen utfördes med traktor, spår intill spår.

Såbäddsberedning med harv.

Försöken startades 1965.

Provtagning för kompressionsprov utfördes på led b, c och E.

I redogörelsen medtages endast led b (opackat) och led E (packat) för att öka överskådligheten.

Säby, packning - såtidsförsök

Jordart: Måttligt mullhaltig lerig mo

Försöksplan:

- | | |
|----|---|
| A | Extremt tidig sådd |
| TO | Tidig sådd, ingen packning |
| T1 | Tidig sådd och packning. Traktor med enkla bakhjul |
| T2 | Tidig sådd och packning. Traktor med dubbla bakhjul |
| MO | Medeltidig sådd, ingen packning |
| M1 | Medeltidig sådd och packning. Traktor med enkla bakhjul |
| M2 | Medeltidig sådd och packning. Traktor med dubbla bakhjul |
| NO | Normaltidig sådd, ingen packning |
| N1 | Normaltidig sådd och packning. Traktor med enkla bakhjul |
| N2 | Normaltidig sådd och packning. Traktor med dubbla bakhjul |

Försöket startades våren 1966. Provtagningen började på den orörda tiltan och fortsatte på led TO, T1 och M1. För överskådlighetens skull redovisas endast resultaten för extremliden TO (opackat) och T1 (packat).

Höstpackningsförsök

Bredänge, Tierp

Försöksplan:

- A: Normal packning och ältning
- B: Skonsam behandling (motsvarande hästdrift)
- C: Kraftig packning och ältningen enstaka höst
- D: Kraftig packning och ältning varje höst

Liksom på föregående försök uttogs prover på tre led: A, B och D. Endast resultaten från extremliden B och D redovisas här.

I tabell 1 redovisas resultat av mekanisk analys och några fuktighetskonstanter för de olika provplatserna.

Tabell 1. Mekanisk analys och fuktighetskonstanter för de olika jordarna. Viktsprocent.

Plats	Ler	Fin- mjäla	Grov- mjäla	Finmo	Grovmo	Sand	Glödför- lust	Nedre plastiska gränsen	Vissn. gränsen
L:a Sun- nersta nedre försöket	54	14	9	9	7,2	1,3	6,4	29	21,0
Övre för- söket	28	11	9	13	31,7	3,7	4,2	20	11,0
Säby	14	6	9	33	28,0	3,0	7,0	32	12,0
Tierp	23	11	18	25	13,7	3,4	4,8	26	12,0

Provtagning och behandling av provproppar.

Provpropparna uttogs i matjordens centrala del, strax under harvdjup (lagret 4 - 8 cm under markytan). Vid varje provtagningstillfälle uttogs 10 parallella prover. Av praktiska skäl kunde provtagningen ej ske slumpmässigt. Detta skulle ha spolierat packningsförsöket. Provpropparna uttogs på rad i försöksrutans ena kant, och för hela provtagningsserien behövdes då 2 - 3 m av försöksrutans längd. Tyvärr ledde detta till en viss periodisk variation i materialet, då strukturen efter plöjningen ej helt utjämnades vid värbearbetningen. Om ej kompressionsprov omedelbart kunde utföras lagrades propparna i kylskåp vid temperaturen +1°. Före kompressionsprovet torkades propparna vid 105° för bestämning av vattenhalten. Mekanisk sammansättning och fuktighetskonstanter för de olika jordarna återfinnes ovan.

3. Beräkningsmetoder och redovisning av resultaten.

Allmänna samband.

Mellan porositeten (n), torra volymvikten (χ) och jordmaterialets specifika vikt (ϱ) råder följande samband:

$$n = \left(1 - \frac{\chi}{\varrho}\right) \cdot 100$$

Porositeten är alltså en rätlinjig funktion av volymvikten. För jordarnas mineraldel är specifika vikten (ϱ) i allmänhet ca 2,65. Är jordens mullhalt ej alltför hög erhålles därför ett tämligen gott värde på porositeten om $\varrho = 2,65$ insättes i ovanstående formel. I den gjorda undersökningen har dock specifika vikten bestämts för varje enskild jord, och detta värde har i förekommande fall använts vid beräkningen av porositeten.

Beräkningar på tryckta cylinderprover.

Då volymen för alla cylindrar var 100 cm³ kunde jordens ursprungliga volymvikt lätt bestämmas:

$$\chi_i = \frac{\text{torrvikt}}{100}$$

Mellan resulterande volymvikt efter tryckning (X_t), cylinderprovets höjd (z), och höjdförändringen vid tryckning (Δz) råder följande samband:

$$X_t = \frac{z}{z - \Delta z} \cdot X_1$$

Detta har använts för att överföra kompressionsprovets primärdata (Δz) till volymviktsvärden.

Resultatens redovisning.

Kompressionen ger sig till känna som en ökning av jordens volymvikt och en minskning av porositeten. Dessa storheter står i ett enkelt förhållande till varandra, och båda kan användas för att karakterisera packningsgraden. Porositeten är den som bäst beskriver marken som växtplats. I denna redogörelse används emellertid genomgående volymvikten som ett mått på packningsgraden, huvudsakligen av praktiska skäl.

Som kriterium på jordens fuktighetstillstånd har använts vattenhalten i viktsprocent. Det är uppenbart att denna storhet i många fall otillräckligt karakteriserar tillståndet i jorden. Det vattenbindande trycket skulle ge en exaktare beskrivning av fuktighetstillståndet och det vore desstuom lättare att återföra till fältförhållanden. Emellertid medför det så många praktiska fördelar i experimentarbetet att använda vattenhalten i viktsprocent som huvudvariabel, att detta i viss mån kan uppväga de principiella olägenheterna. Några fuktighetskonstanter som ger närmare innebörd till viktsprocenterna återges i tabell 2 och diagram 1 - 4.

3.1. Metodens allmängiltighet.

Avsikten med kompressionsprovet är att utsätta jorden för ett definierat och likformigt tryck och avläsa resultatet. Emellertid kan man ej utan vidare antaga, att tryckning med kolv i en cylinder, så som skett vid det använda kompressionsprovet, ger ett sådant definierat och likformigt tryck. Särskilt två faktorer kan störa: Jordprovets friktion mot cylinderväggen och ojämna tryckfördelning inom jordprovet. Beträffande provpropparna i naturlig lagring tillkommer risken för dålig anslutning mellan provpropp och cylindervägg. Ganska mycket arbete ägnades åt metodstudier, och resultatet kan sammanfattas sålunda:

1. Eliminering av jordprovets friktion mot cylinderväggen med infettad plastfolie hade mycket obetydlig inverkan på resultaten när det gällde jordar som provats (styv lera - lerig mo).
2. Provets höjd i cylindern (gränsvärden z och $0,25 z$) hade ingen systematisk inverkan på resultaten (tabell 1). Ju lägre provets höjd är, desto homogenare bör tryckfördelningen i provet bli, och desto mindre inverkar friktionen mot cylinderväggen. Ingen inverkan av variationer i z betyder alltså någorlunda jämn tryckfördelning och ringa inverkan av friktion mot cylinderväggen även vid full provhöjd.

Tabell 2. Uppmätt volymvikt vid olika jordmängd i cylindern. Material: aggregat < 2 mm, jord från provplatserna. Tryck: 2 kp/cm², hållfasthetsprovaren.

	Jordmängd g	Fyllningsgrad	γ_f
Lerig mo	100	1/1	1,19
Vattenhalt 22%	50	1/2	1,20
	25	1/4	1,18
Styv lera	100	1/1	1,34
Vattenhalt 27%	50	1/2	1,39
	25	1/4	1,36

3. Volymviktsbestämningar enligt paraffinmetoden på delar av kompromerade jordprover (aggregatfraktion 1 - 2 mm) visade inga systematiska signifikanta skillnader mellan provets centrala del och yttre delar och endast en svag tendens till högre volymvikt för den övre delen jämfört med den undre. Cylinderprovet torkades så det blev helt fast, delades med metallsåg i en övre (närmast tryck-kolv) och en undre halva, varefter dessa bröts itu så att flera ytterdelar och en mittdel erhöles. Den opressade kanten runt tryckkolvens periferi bortbröts (utom på cylinder 163). Volymbestämningarna utfördes av Fiedler (1964).

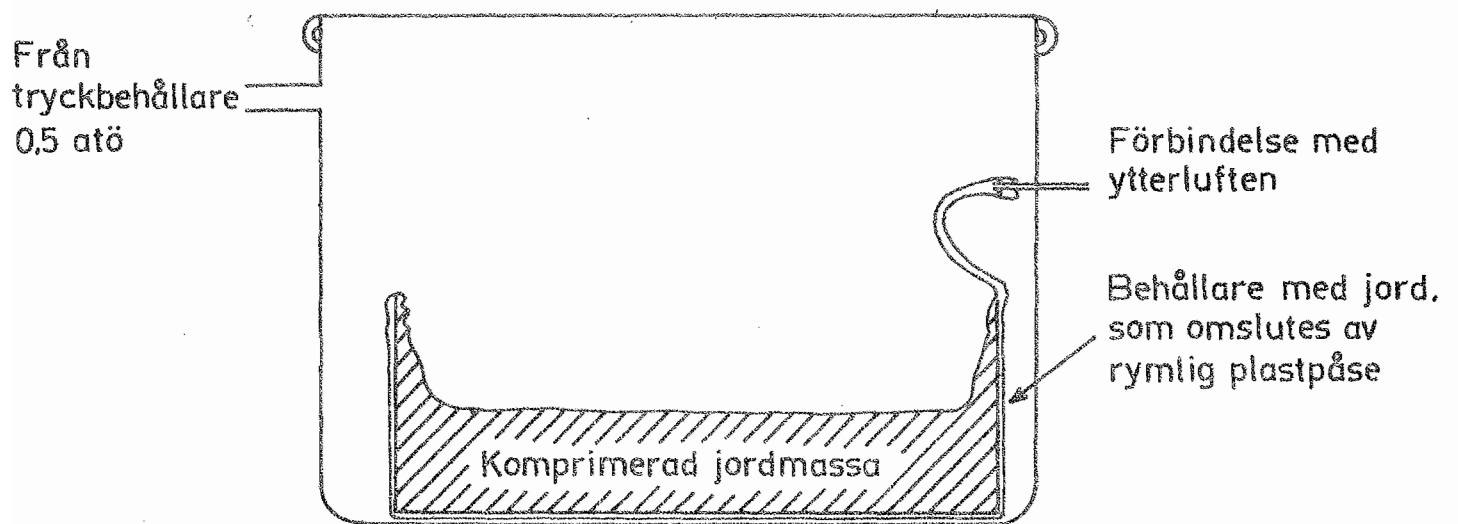
Tabell 3. Volymsbestämningar enligt paraffinmetoden på delar av tryckta cylinderprover (aggregatfraktion 1 - 2 mm).

Cyl.nr	Delens läge	Volymvikt	Medeltal, jämförelser och signifikans mellan olika delar av resp. cylinder
166	över ytter	1,72	
	" "	1,62	
	" "	1,72	
	" "	1,71	
	" mitt		
	under ytter	1,61	
	" "	1,62	
	" "	1,63	
	" "	1,61	Ytter 1,66 - mitt 1,66, ej sign.
	" mitt	1,70	Över 1,68 - under 1,63, ej sign.
167 (ej halverad)	ytter	1,49	
	"	1,57	
yttersta kna- ten bortbru- ten	mitt	1,61	
163 (ej halverad)	ytter	1,65	
	"	1,61	
med yttersta kanten	mitt	1,60	
168	över ytter	1,71	
	" "	1,77	
	" "	1,66	
	" "	1,62	
	" mitt	1,69	
	under ytter	1,50	
	" "	1,60	
	" "	1,61	
	" "	1,57	
	" "	1,59	Ytter 1,63 - mitt 1,65, ej sign.
	" mitt	1,60	Över 1,69 - under 1,58*

4. Kompression med kolv i cylinder jämfördes med kompression genom lufttryck av större jordnassa innesluten i plastpåse. Nära överensstämmande resultat erhöles.

Vid försöket användes en tryckbehållare enligt figur 3.

Homogen jord, aggregatstorlek 1 - 2 mm, användes. Efter kompression, som fick fortgå tills jämvikt nåtts och ingen luft strömmade ut från behållaren uttogs cylinderprover för volymviktsbestämning i den komprimerade jorden. Samtidigt gjordes ordinarie kompressionsprov med kolv på samma jordmaterial. Resultaten redovisas i tabell 4.



Figur 3. Tryckhållare för kompression med definierat lufttryck

Tabell 4. Jämförelse mellan kompression av större jordmassa genom lufttryck och kompression i cylinder med kolv. Tryck 0,5 kp/cm².

Volymvikt efter kompression

Lufttryck	Cylinder med kolv
3 parallella	2 bestämningar
cylinderbestämningar	
1,40	1,40
1,40	1,42
1,42	

5. Tryckning med konstant tryck i 30 sekunder med hävstångsapparaten gav samma resultat som körning i hållfasthetsprovaren med lägsta hastighet (2 mm/min.). Högre hastighet på hållfasthetsprovaren gav lägre volymvikt vid samma tryck.

Metodstudiernas resultat ger vid handen att man med god approximation kan överföra data från kompressionsprovet till att gälla motsvarande volymselement i en belastad markprofil. Vidare ger de båda kompressionsmetoder som använts jämförbara resultat.

4. Resultat.

4.1. Sambandet mellan uppnådd volymvikt och fuktighetsförhållanden.

4.1.1. Allmänna tendenser.

I diagram 1 - 4 redovisas mätvärden från upptorkningsförloppet under våren på de fyra provplatserna. Medelvärdena på de 10 parallellprovens ursprungliga volymvikt, resulterande volymvikt efter tryckning och vattenhalt i viktsprocent har utmärkts. Trycket var 2,0 kp/cm², vilket är något mera än vad som kan väntas under traktorer med normal hjulustrustning. Variationen mellan de olika provtagningstillfällena är stor, men vissa tendenser kan ändå skönjas. I det allra första skedet av upptorkningen ökar packningsbenägenheten något, ett maximum uppnås, varefter tryckets inverkan vid ökad upptorkning alltmer minskar. Högsta volymvikt efter packning, uppmätt vid provtagningstillfället, erhålles med den använda metodiken efter en viss upptorkning, och detta känsliga stadium i matjordens centrala del tycks någorlunda sammanfalla med normal tid för vårbruket.

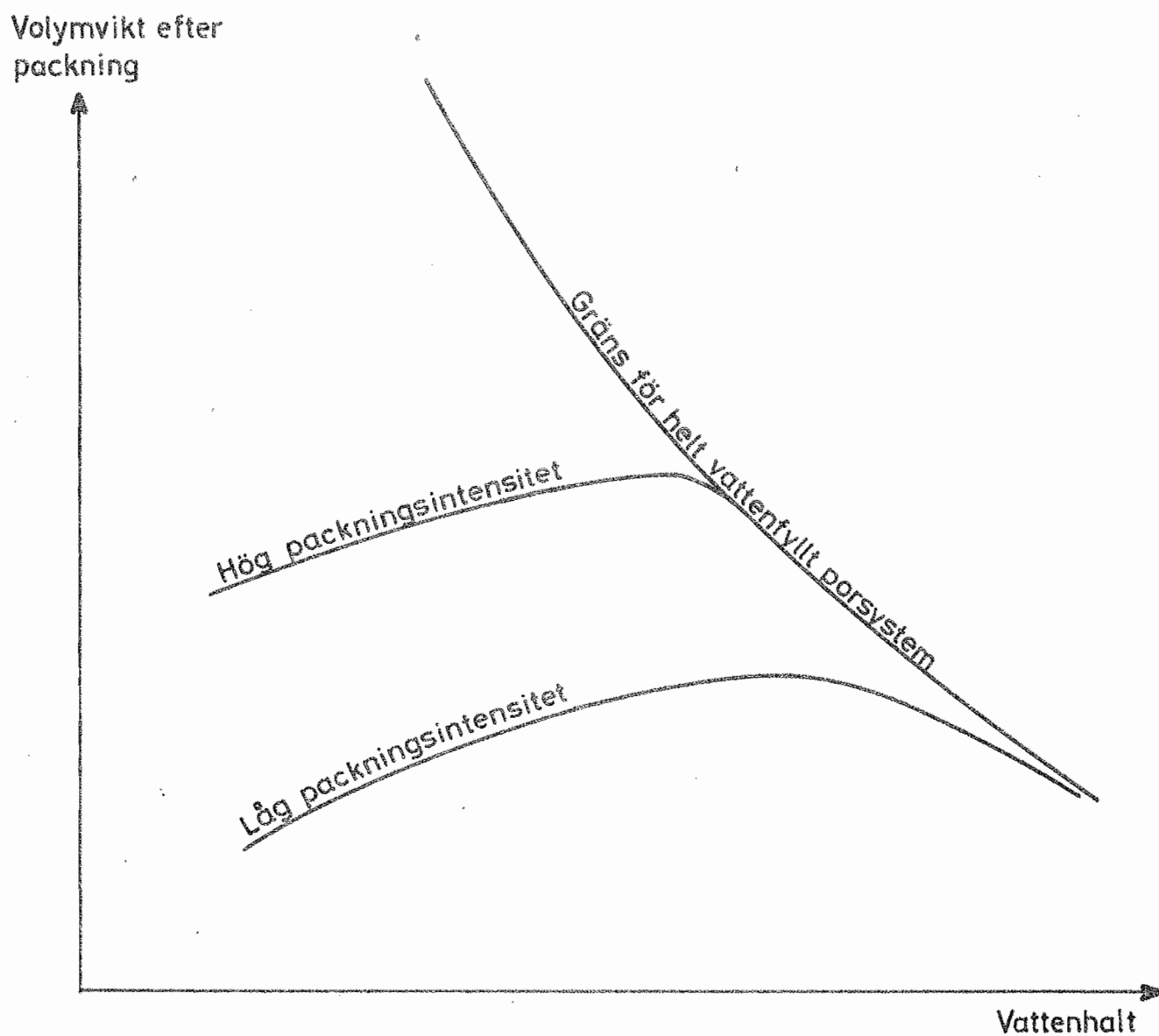
Av diagram 1 - 4 framgår även en annan tendens. På de traktorpäckade leden ökar volymvikten starkt under upptorkningens gång. Detta är tydligast när packningen skett vid hög vattenhalt, och effekten ökar med lerhalten. Packningen har delvis förstört jordens ursprungliga aggregatstruktur, så att den sväller och krymper i stora enheter. Vid upptorkningen bildas då kompakta jordblock skilda åt av stora sprickor. Vid provtagning enligt den använda cylindertechniken undviks gärna större sprickor, och man får därför ett värde på volymvikten som är högre än genomsnittet för hela matjordslagret. Emellertid torde denna teknik ge en riktigare bild av jorden som växtplats än mätningar gjorda på stora jordvolymmer, varför iakttagelserna bör ha en viss praktisk betydelse. På lerjordar

ger tydligen den omedelbart uppmätta packningseffekten otillräcklig information om hur jorden har påverkats av belastningen. Den strukturförstöring som kan ske kommer ej helt till uttryck i den omedelbara volymviktsökningen, men den ger krympningskrafterna tillfälle att verka på stora jordvolymen, och detta kan senare ge en större kompressionseffekt än själva belastningen. Praktiskt betyder detta, att man på lerjordar ej kan utnyttja den nedgång i packningsbenägenheten som kan uppmätas vid tillräckligt höga vattenhalter (se diagram 1 - 3 samt figur 4). Vid höga vattenhalter är risken för strukturförstöring stor på sådana jordar.

Den stora variationen mellan de olika medelvärdena i diagram 1 - 4 beror på att jordens ojämna struktur efter höstplöjning och tidig vårsplöjning slår igenom, i särskilt hög grad eftersom provtagningen var systematisk (se bilaga). Endast mycket grova tendenser kan avläsas i dessa diagram, där värdena från varje packningsled betraktats som en klass med avseende på strukturen.

Samma datamaterial presenteras på ett annat sätt i diagram 5 - 8. Här användes sammanhörande värden för enskilda provproppar. För varje provpropp, vars volymvikt faller inom bestämda, smala volymviktsklasser, har värden på vattenhalt och resulterande volymvikt efter kompressionsprov markerats. Klasserna har valts så, att de någorlunda representerar variationsområdet för volymvikten. Ingen hänsyn har tagits till att propparna har uttagits på olika packningsled. Här framgår något tydligare än på diagram 1 - 4 att det finns ett maximum i packningsbenägenhet i ett visst vattenhaltsområde. Överensstämmelsen mellan de båda diagramserierna beträffande detta maximums läge är god.

Figur 4 är ett principdiagram över packningsbenägenhetens (volymvikt omedelbart efter packning) variation med vattenhalten. Det förutsättes att packningen sker så snabbt att vatten ej pressas ut ur packningszonen, och detta villkor är i allmänhet uppfyllt under rullande hjul. Den förtätningsbara volymen utgöres då av det luftfyllda porsystemet. I en given jord minskar i så fall den förtätningsbara volymen när vattenhalten ökar. Med ökande vattenhalt minskar å andra sidan hållfastheten hos jordens strukturelement, så att deformationen och förtätningen sker lättare. Som resultat erhålles en maximikurva, om volymvikten omedelbart efter packning framställs som funktion av vattenhalten.



Figur 4. Packningsbenägenhetens beroende av vattenhalten
(efter Proctor 1933)

Maximets läge är beroende av packningens intensitet. Ökar intensiteten förskjuts maximets läge åt det torra hållet. Detta innebär att för hjul med lågt marktryck uppnås maximal packningsverkan vid hög vattenhalt hos jorden, medan hjul med högt marktryck har störst packningsverkan under torrare förhållanden. Packningsbenägenheten hos en jord varierar alltså både absolut (uppnådd volymvikt) och relativt (känsligt vattenhaltsområde) med tryck och packningsmetod.

I den här refererade delen av undersökningen användes ett statiskt tryck av 2 kp/cm^2 , vilket är något högre än under flertalet traktorhjul. En traktor skulle alltså haft maximum packningseffekt vid vattenhalter något högre än laboriemetodens maximivärden (diagram 1 - 8). Även andra förhållanden försvårar en jämförelse mellan laboriemetoden och traktorpäckning i fält. Under ett rullande hjul varierar trycket i intensitet och riktning (vibrationer, ältande effekt). Hjulet ger upphov till s.k. dynamiskt tryck, som har större omedelbar packningseffekt än ett statiskt tryck av samma storlek. Det finns dock starka skäl att tro, att packningsbenägenheten för dynamiskt tryck samvarierar med den för statiskt tryck av samma storlek (se ett följande avsnitt). Även belastningstidens längd har inverkan. Päckningen sker inte momentant. Förloppet vid laboriemetoden är i huvudsak avslutat efter 10 - 20 sek., men under den första sekunden sker 50 - 90 % av päckningen. En traktor med hastigheten 6 km/tim belastar en punkt av marken under ca $1/3$ sekund. I försök som utförts (Vomocil et.al. 1958) har höga hastigheter hos traktorn inte reducerat päckningen nämnvärt. Troligen kan den korta belastningstiden under ett rullande hjul i viss mån kompenseras av tryckets dynamiska natur.

Försök att direkt jämföra laboriemetoden med traktorpäckning i fält misslyckades till följd av den stora spridningen på volymviktsvärdena i fält. En viss ledning erhålles emellertid av diagram 1 - 3. Volymvikten för opackat led efter päckning genom kompressionsprov i laboriet ligger konsekvent något högre än den volymvikt som ernåtts vid traktorpäckning i fält (volymvikten för packat led just efter päckningstillfället). Detta är också väntat, då laboriepäckningen skedde med trycket $2,0 \text{ kp/cm}^2$, medan traktorhjulets specifika marktryck var ca $1,2 \text{ kp/cm}^2$.

I denna undersökning, liksom i flertalet andra, används vattenhalten i viktsprocent som variabel. Vattenhalten är en lättbestämbar storhet. Ett villkor för att den skall kunna användas invändningsfritt i sammanhang som detta, är dock att fuktighetsjämvikt råder i jorden, att kolloidernas svällningsprocesser gått till jämvikt. Iakttagelser vid kompressionsproven (se sid. 20) gav vid handen, att nyfuktad jord är vida mer packningsbenägen än jord som lagrats någon tid. Under lagringen upptar lerkolloiderna vatten och sväller, och detta innebär att vattenmängden i det något grövre porsystemet minskar. Därmed minskar vattenmeniskernas krökningsradie, och det tycks vara denna krökningsradie, det vattenbindande trycket, snarare än vattenmängden i jorden som har inflytande på packningsbenägenheten (jordens hållfasthet). En sådan stabiliseringseffekt har påvisats av bl.a. Potapov (1966). I praktiken innebär detta, att lerhaltiga jordar är mera packningsbenägna just efter ett regn än vid motsvarande vattenhalt någon tid senare.

4.1.2. Enskilda lokaler.

Lilla Sunnersta, vårpackningsförsök.

Jordart: Måttligt mullhaltig styv lera.

Provtagningen började den 25/4 1965, strax efter det tjälen gått. Den tidiga traktorpackningen utfördes den 28/4 och ledde till en uppgång i volymvikten från 1,28 till 1,42 g/cm³, den medeltidiga packningen den 11/5 ökade volymvikten från 1,31 till 1,36 g/cm³. Enligt diagram 5 är jorden mest packningsbenägen vid en vattenhalt av ca 28 %, och denna medelvattenhalt erhöles första veckan i maj, i början av den normala tiden för vårbruket. Det är emellertid tydligt, att störst strukturlåverkan, högst volymvikt i medeltal för vegetationsperioden, erhålles vid den tidigare packningen. Även om en mycket tidig packning ger mindre omedelbar effekt än en senare ger den under upptorkningens gång upphov till den största volymviktsökningen. En laboratoriemässigt bestämd omedelbar packningseffekt är på jordar med utpräglade svällningsegenskaper otillräcklig som mått på helhetseffekten i fält under vegetationsperioden. Volymviktsvärdena motsvarar i porositet: omedelbart efter packning: 43 %, efter senare upptorkning: 39 %.

Lilla Sunnersta, vårpackningsförsök.

Jordart: Något mullhaltig lätt mellanlera.

Tjälen försvann helt under helgen omkring 1 maj, och därefter skedde dränering och upptorkning mycket snabbt. Tidig packning utfördes den 2/5. Den uppmätta effekten är liten (ökning från volymvikten 1,50 till 1,52 g/cm³), men här har tydligen uppstått ett systematiskt fel vid provtagningen, som gett ett för lågt värde på packningseffekten. Vattenhalten vid packningen var 21 - 22 %, vilket nära sammanfaller med maximala packningsbenägenheten enligt diagram 6. Jordarten har i sig hög volymvikt och låg porositet och kan packas till mycket låga porositetsvärden (36 %). Det packningsbenägna stadiet är emellertid kortvarigt på denna lokal.

Säby, vårpacknings- och såtidsförsök.

Jordart: Måttligt mullhaltig lerig mo.

Jorden torkade upp sakta, troligen på grund av kapillär transport från en tämligen högt stående grundvattenyta. Packningsbenägenheten ökade med upptorkningen till en vattenhalt av ca 31 %, vilket inträffade den 10/5. Den 11/5 utfördes den tidiga packningen, som ökade volymvikten från 1,15 till 1,30 g/cm³. Därefter minskar packningsbenägenheten med upptorkningen, men beroendet är ej så starkt som på de mera lerhaltiga jordarna. Jorden har hög porositet: lägsta uppnådda värde med trycket 2 kp/cm² är 44 %.

Bredänge, Tierp, höstpackningsförsök.

Jordart: Måttligt mullhaltig mjällig molättilera.

Tre packningsled följdes: normal behandling (A), skonsam behandling (B) och kraftig packning och ältning varje höst (D). Plogtiltan såg kompaktare ut på led D, men inga skillnader i volymvikt kunde påvisas. Inget maximum i packningsbenägenhet kunde heller påvisas, troligen på grund av att provtagningarna påbörjades för sent.

4.1.3. Jämförelse mellan jordarter och lokaler.

Den styva leran på Lilla Sunnersta blir troligen lättast utsatt för packningsskador. Det känsliga stadiet är ganska långvarigt på grund av den långsamma upptorkningen av matjordens djupare lager och mycket låga porositetsvärden kan uppstå, särskilt efter upptorkning. Den lätta mellanleran på Lilla Sunnersta är mycket känslig under det allra första upptorkningsskedet, men detta är så kortvarigt att körning under denna tid går att undvika. Molättleran på Tierpsförsöket visade sig vara motståndskraftigare, men här kom undersökningen ej att omfatta det mest packningsbenägna stadiet. Det är dock möjligt, att dräneringen skedde så snabbt att det aldrig hann utbildas i fält heller. Mest motståndskraftig mot packning är den leriga mojorden från Säby.

4.2. Sambandet mellan volymvikt och pålagt tryck.

En serie tryckprov utfördes med cylindrar fyllda med lös jord från de ovannämnda fyra lokalerna. En bestämd aggregatfraktion (50 viktsprocent 0,25 - 2 mm, 50 viktsprocent 2 - 5 mm) fuktades meddelst sprayning till önskad vattenhalt och lagrades i tillslutna plastpåsar minst 2 veckor för fuktighetsutjämning. Cylindrarna fylldes sedan med uppvägd mängd jord och packades i 2 omgångar, om så erfordrades, så att jordens torra volymvikt uppgick till 1,00, 1,15 och 1,30 g/cm³. Kompressionsprov utfördes sedan i hållfasthetsprovaren i tryckområden 0 - 2 kp/cm². Efter tryckning torkades proppen för kontroll av vattenhalten. Det befanns att en viss avdunstning hade skett under lagringen.

För varje kombination av initialvolymvikt och vattenhalt gjordes 3 parallella bestämningar. På grund av en viss vattenhalts- och strukturvariation erhöles ej helt identiska kurvor men överensstämmelsen var dock mycket god.

I diagrammen redovisas endast en av parallellbestämningarna. Den har valts, vars volymvikt närmast överensstämde med den avsedda. Därigenom erhöles värden som väsentligt underlättade räknearbetet.

Man hade anledning förvänta ett ungefärligt logaritmiskt samband mellan volymvikt (eller porositet) och pålagt tryck. Sålunda har Reaves & Nichols (1955) framhållit sambandets logaritmiska natur, Söhne (1952) har angivit formeln

$$n = -A \ln p + B$$

och Hovansian & Buchele (1959) har bestämt koefficienterna A och B i denna funktion och genomfört räkneexempel för olika jordar. I en del fall har dock andra funktioner (t.ex. hyperblar) anpassats till kompressionsförloppet (exempelvis Kuipers 1959), men avsikten har tydligen då ej varit att direkt relatera volymvikt och tryck. Kuipers utförde kompressionen i cylindrar med stor höjd i förhållande till diametern. Värdena anger då ej volymselementets reaktion, utan snarare nedsjunkningsförloppet i profilen som helhet.

För de fyra jordarna vid traktorpäckningsförsöken är resultatet tämligen entydigt (diagram 9 - 32). Volymvikten (χ) är vid högre tryck med mycket god approximation en rätlinjig funktion av logaritmen för trycket ($\log p$) oavsett den ursprungliga volymvikten. Detta är fallet såväl

för cylindrar fyllda med lös jord (diagram 9 - 28) som för i fält uttagna provproppar (diagram 29 - 32). Sambandet mellan jordens volymvikt och pålagt tryck har alltså formen

$$\chi = c \log p + k \quad (c \text{ och } k \text{ är konstanter})$$

Sambandet kan också uttryckas i porositet:

$$n = -a \log p + b \quad (a \text{ och } b \text{ är konstanter})$$

Tabell 5. χ -p-funktioner

Funktionerna är grafiskt bestämda i tryckområdet 0 - 2 kp/cm² (funktionens logaritmiska del).

Styv lera (Lilla Sunnersta, nedre försöket)

Vattenhalt %	Funktion
31	$\chi = 0,47 \log P + 1,29$
28	$\chi = 0,50 \log P + 1,22$
27	$\chi = 0,50 \log P + 1,21$
24	$\chi = 0,43 \log P + 1,14$
22	$\chi = 0,40 \log P + 1,09$

Lätt mellanlera (Lilla Sunnersta, övre försöket)

22	$\chi = 0,47 \log P + 1,44$
19	$\chi = 0,47 \log P + 1,35$
17,5	$\chi = 0,40 \log P + 1,25$
17	$\chi = 0,40 \log P + 1,22$
14	$\chi = 0,37 \log P + 1,17$

Mjällig molättilera (Tierp)

27	$\chi = 0,40 \log P + 1,30$
24	$\chi = 0,37 \log P + 1,23$
21	$\chi = 0,37 \log P + 1,21$
18	$\chi = 0,40 \log P + 1,17$

Lerig mo (Säby)

33	$\chi = 0,30 \log P + 1,22$
31	$\chi = 0,33 \log P + 1,20$
29	$\chi = 0,33 \log P + 1,16$
24	$\chi = 0,33 \log P + 1,12$
19	$\chi = 0,30 \log P + 1,07$

Förtättningsförloppet är inte reversibelt på kort sikt. Ovanstående samband gäller alltså bara för ökande tryck, och dessutom måste funktionens χ överstiga den ursprungliga volymvikten. När volymvikten ökat så mycket att det luftfyllda systemets volym börjar närma sig värdet noll, upphör funktionen åter att gälla.

Det är möjligt, att ur erhållna försöksdata få värden på konstanterna i ovanstående funktioner (tabell 5). Tendensen i det samlade materialet är intressant. Koefficienten för $\log p$ (dvs. c) är relativt okänslig för vattenhaltsvariationer, medan den konstanta termen k ökar med ökande vattenhalt. Den räta linjen i χ - $\log p$ -diagrammet har alltså samma lutning vid olika vattenhalter. Det skulle betyda, att i en viss jord en viss multipel tryckökning ger samma absoluta ändring i volymvikt eller

porositet oavsett vattenhalt, men ändringen sker på olika totalnivåer.

Hur allmängiltigt är detta samband mellan volymvikt och pålagt tryck? Tryckproven av cylindrar med lös jord utfördes med 2 - 3 paralleller, och i allmänhet erhöles god överensstämmelse. De i fält uttagna provpropparna hade oftast så hög volymvikt, att man vid provets maxtryck 2 kp/cm^2 ej nått fram till förtättningsförloppets logaritmiska del. Endast för de få proppar, vars volymvikt var tillräckligt låg, kunde det logaritmiska sambandet mellan volymvikt och tryck konstateras (diagram 29 - 32). Variationen mellan propparna är tämligen stor, beroende dels på stora strukturolikheter, dels på osäker anslutning mellan propp och cylindervägg. Klart är dock, att sambandet mellan volymvikt och logaritm för trycket i de allra flesta fallen även här övergår till att bli nära rätlinjigt, när trycket ökat tillräckligt.

De fyra sinsemellan helt olika jordarna från packningsförsöken visade sig således alla tendera mot ett rätlinjigt samband mellan χ och $\log p$ vid ökande tryck. Tecken på små men dock systematiska avvikelser från detta mönster uppvisade däremot jordar från Lövsta, Uppland (diagram 34 och 35), som användes för att studera mullhaltens inverkan på packningsbenägenheten (se nedan). Halten org. C varierade mellan 7,8 och 2,4 %, och även den mullfattigare jorden avvek från det förut skisserade mönstret. Förhållandet kan därför inte utan vidare tillskrivas den högre mullhalten. Liknande avvikelser från huvudmönstret har av Hovanesian & Buchele (1959) rapporterats för mjålarika jordar.

Ytterligare belysning av förtättningsförloppet ger diagram 33. Fyra cylindrar med exakt lika mängd lös jord har komprimerats i hållfasthetsprovaren. När en viss belastning uppnåtts (0 resp. 0,5, 1,0 och $2,0 \text{ kp/cm}^2$) kördes maskinen baklänges så att belastningen gradvis upphörde, varefter belastningen åter ökades till föregående värden. Detta upprepades 10 gånger, och sedan fortsattes tryckprovet som vanligt till $2,0 \text{ kp/cm}^2$. Man ser på diagram 33 tydligt två faser av förtättningsförloppet: det första stadiet, då trycket uppbyggdes utan att nämnvärd förtätning sker (χ -p-funktionens χ understiger den ursprungliga volymvikten) samt det egentliga förtätningsskedet, där ett approximativt linjärt samband mellan χ och $\log p$ råder. Diagrammet antyder vidare, att förtätningen i förstone ökar med antalet belastningar, men att ett gränsvärde ganska snart uppnås, där ytterligare belastningar till samma tryck ej har någon inverkan alls. Två belastningar motsvarar enligt diagram 33 en tryckökning på 5 - 10 % jämfört med ursprungligt tryck och tio belastningar och däröver ca 20 %. Dessa effekter raderas ut helt, om trycket ytterligare ökas.

Diagram 34 visar förtättningsförloppet i två cylinderprover som uttagits i en jordmassa, som med lufttryck förtryckts med $0,5 \text{ kp/cm}^2$. Kurvan kan uppdelas i två grenar, en under $0,5 \text{ kp/cm}^2$ och en över $0,5 \text{ kp/cm}^2$. Dessa grenar kan tänkas återspegla var sin fas av förloppet: tryckuppbyggnad resp. egentligt förtätningsskede.

I det föregående har bl.a. visats hur vattenhalten inverkar på packningsbenägenheten, och några andra faktorer inverkan kommer att något belysas i det följande. Det är klart, att varje ändring i packningsbenägenheten manifesterar sig i ändringar av den beräknade χ -p-funktionens koefficienter, så som exemplifierats för vattenhalten. Då det emellertid är osäkert hur allmängiltigt och reproducerbart det här påvisade linjära sambandet mellan χ och $\log p$ är, för det för långt att på detta stadium föra resonemanget vidare i den riktningen.

4.3. Strukturens inverkan på packningsbenägenheten.

Strukturen kan inverka på packningsbenägenheten dels direkt, genom att en viss struktur lättare faller sönder och deformeras än en annan, dels indirekt, genom att den vattenhållande förmågan till en viss del bestäms av strukturen. En finaggregerad jord kan kvarhålla mera vatten än en grovaggregerad, och vattenhalten har som förut visats stor betydelse för packningsbenägenheten. Undersökningen utfördes därför i två moment: ett där det vattenavförande trycket hållits konstant, och ett vid konstant vattenhalt i viktsprocent. Som strukturvariabel användes aggregatstorleken (aggregatfraktionerna $<0,25$ mm, $0,25 - 2$ mm och $2 - 5$ mm). Befuktningen skedde direkt i cylindern. Tid mellan befuktning och kompressionsprov (vid konstant vattenhalt) var endast ca 3 tim. Det visade sig, att fuktighetsjämvikt ej kan inställa sig under denna tid. Proverna verkade oväntat våta. Denna befuktningsmetod är alltså olämplig. Resultaten redovisas i tabell 6.

Tabell 6. Packningsbenägenheten hos jordar av olika aggregatstorleksfördelning.

A. Tryckning vid ett vattenavförande tryck av $0,25 \text{ kp/cm}^2$.
Belastning: $1,5 \text{ kp/cm}^2$.

Aggregatfraktion	Vattenhalt %	Volymvikt vid belastning
Styv lera		
$<0,25$ mm	30	1,38
	30	1,39
2 - 5 mm	26	1,33
	26	1,32
Lätt mellanlera		
$<0,25$ mm	23	1,54
	23	1,52
2 - 5 mm	19	1,44
	19	1,44

B. Tryckning vid konstant vattenhalt (25 %).

Styv lera	Volymvikt vid olika belastningar		
Aggregatfraktion	$0,5 \text{ kp/cm}^2$	1 kp/cm^2	2 kp/cm^2
$<0,25$ mm	1,40	1,53	1,66
$0,25 - 2$ mm	1,36	1,51	1,65
2 - 5 mm	1,43	1,58	1,72

Det bakomliggande materialet är litet, men vissa tendenser är dock av värde att påpeka. Vid lika vattenhalt (viktsprocent) minskar packningsbenägenheten något med ökad finleksgrad. Extrem finfördelning kan möjligen åter öka packningsbenägenheten. Vid konstnat vattenavförande tryck ($0,25 \text{ kp/cm}^2$; vilket ungefär motsvarar fältkapacitet) är finjorden mest packningsbenägen på grund av den högre vattenhalten.

Det är att märka, att i den del av försöket, där vattenhalten var konstant (avsnitt A) erhöles oväntat höga värden på volymvikten (jämför diagram 9 - 13 med tabell 2). Tryckprovet följde här alltför tätt inpå befuktningen (ca 3 tim.). Fuktighetsjämvikten hann ej inställa sig, och packningsbenägenheten är då onormalt hög.

4.4. Mullhaltens inverkan på packningsbenägenheten.

Jordmaterialet till detta undersökningsmoment hämtades på Lövsta gård, Uppland. Mineraljorden är här av mellanlerakarakter och jordarten ändras från "måttligt mullhaltig" till "mycket mullrik" inom en sträcka av ca 25 m. Aggregatfraktionen 1 - 2 mm användes. Packningsbenägenheten undersöktes dels vid konstant vattenavförande tryck, då fuktighetsjämvikten fick inställa sig i en tryckkammar och dels vid konstant vattenhalt, då befuktning skedde meddelst sprayning, varpå materialet lagrades i tillslutna plastpåsar ca 1 vecka. Resultaten redovisas i diagram 35 och 36.

En ökad mullhalt betydde i båda fallen både mindre porositetsändring vid belastning och större slutporositet. Detta fastän ökad mullhalt betydde starkt ökad vattenhållande förmåga. Vid ett vattenavförande tryck av 2 m vp höll den mullrikaste jorden 40 % vatten och de mullfattigaste 28 %. Humusen har tydligen i alla lägen en starkt stabiliserande inverkan på jordstrukturen.

De redovisade värdena på volymvikt och porositet gäller prover under belastning. Man kunde vänta, att humusen skulle öka jordens elasticitet, men mellan prover av olika mullhalt kunde någon systematisk skillnad i porositetsökning när belastningen upphörde ej konstateras.

4.5. Inverkan av biologisk stabilisering på jordens packningsbenägenhet.

Det är allmänt erkänt, att biologiska omsättningsprodukter stabiliserar jordens struktur och ökar jordens förmåga att motstå strukturnedbrytande krafter. För att undersöka, om denna stabilisering också ökar motståndskraften mot mekanisk packning, utfördes ett enkelt försök:

Plan:

- Led a: ingen biologisk aktivitet. Sterilisering med 5 % formalinlösning
- Led b: måttlig biologisk aktivitet. Endast vatten tillsatt
- Led c: livlig biologisk aktivitet. Socker, halmmjöl och nitrat tillsatt (0,3 g rörsocker, 0,3 g halmmjöl och 0,09 g NaNO_3 per 100 g torr jord).

Jord: styv lera, aggregatfraktionen: 1 - 2 mm.

Utförande: Provcylindrar fylldes med bestämd mängd jord (105 g ts), som förut behandlats på avsett sätt. Vattenhalt: 24 %, vilket motsvarar ett vattenavförande tryck på ca 3 m vp. Lagring vid rumstemperatur under 10 dygn. Kompressionsprov i hållfasthetsprovarerna.

I ett andra moment hölls det vattenavförande trycket konstant (1,5, 2,0 resp. 2,5 m vp) under såväl lagring som tryckning.

Resultaten redovisas i tabell 7 och diagram 37.

Tabell 7. Försök med biologisk stabilisering.

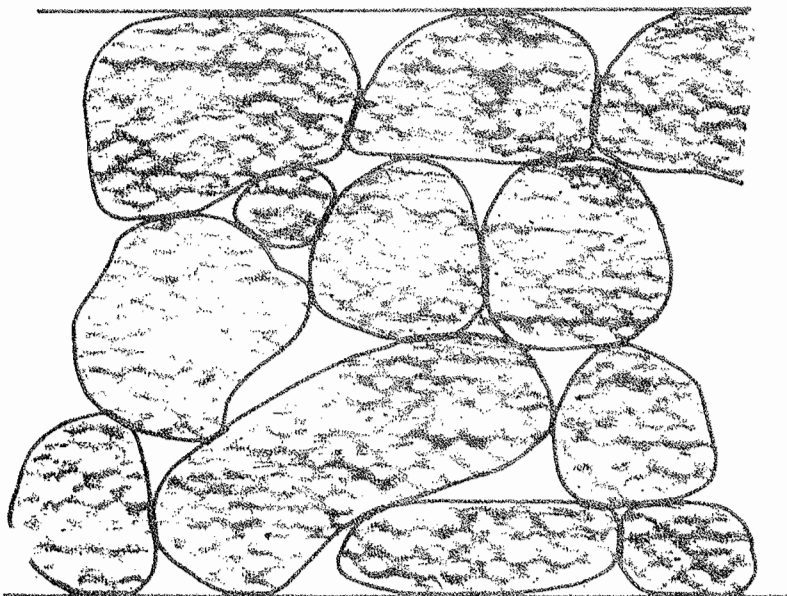
Omsättningsled	Vattenavf. tryck (m)	Vatten- halt	Volymvikt vid olika belastning		
			0,5 kp/cm ²	1 kp/cm ²	2 kp/cm ²
Livlig omsättning (sockertillsats)	1,5	34,6	1,19	1,32	1,44
		34,5	1,19	1,33	1,46
	2,0	34,4	1,20	1,33	1,46
		34,0	1,20	1,33	1,46
	2,5	32,8	1,16	1,29	1,44
		32,7	1,18	1,32	1,45
Svagare omsättning (endast vattentillsats)	1,5	29,6	1,20	1,35	1,50
		29,2	1,18	1,32	1,46
	2,0	28,0	1,17	1,32	1,48
		28,3	1,18	1,32	1,47
	2,5	27,4	1,15	1,28	1,46
		27,6	1,14	1,29	1,45
Ingen omsättning (fenoltillsats)	1,5	28,8	1,20	1,34	1,49
		28,9	1,19	1,35	1,49
	2,0	28,0	1,18	1,33	1,48
		27,9	1,19	1,33	1,48
	2,5	26,3	1,15	1,29	1,47
		26,5	1,13	1,27	1,44

Mikrobiell omsättning ökade motståndskraften mot packning. En tydlig stabiliseringseffekt erhöles genom näringstillsatsen. Okulärt kunde också konstateras livlig biologisk aktivitet i led c (svampmycel etc.) Mindre och osäkra skillnader erhöles mellan leden a och b. Den mikrobiella verksamheten ökade också den vattenhållande förmågan. Ledet med livlig omsättning (c) hade genomgående högre vattenhalter vid samma vattenavförande tryck, men trots detta ökades inte packningsbenägenheten.

5. Modell för packningsförloppet i en aggregerad plastisk jord.

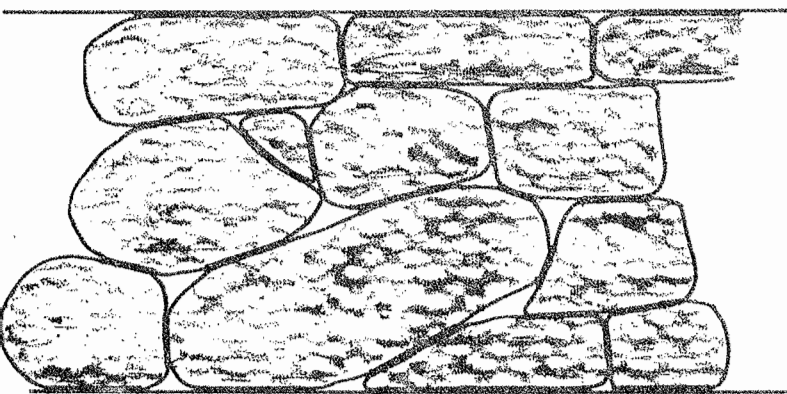
Det är möjligt, att förklara och belysa de resultat, som erhöles i undersökningen genom en hypotetisk modell av packningsförloppet. Denna modell ligger i linje med flertalet arbeten inom området (Söhne 1952, Day & Holmgren 1952, Reaves & Nichols 1955, Hovanesian & Buchele 1959) men det bör ändå starkt betonas att den ej behöver vara generellt giltig, även om mycket tyder på att den i många fall är approximativt riktig.

Låg belastning



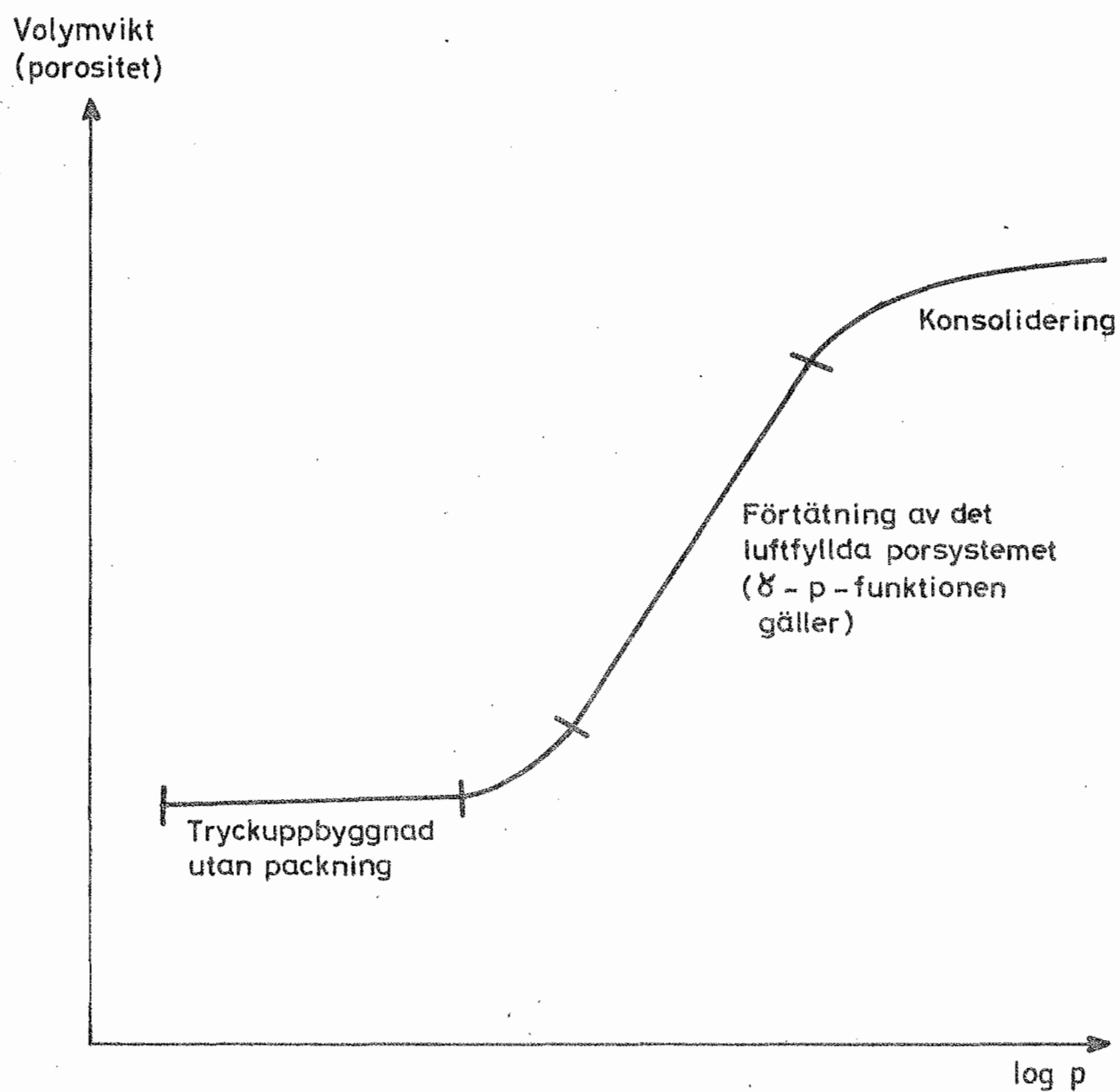
Liten bärande yta
mellan aggregaten

Stor belastning



Stor bärande yta
mellan aggregaten

Figur 5.



Figur 6.

Packningen åstadkommes genom omlagringar och deformationer av jordens strukturelement, så att de bättre utfyller de hålrum som finns. Vid deformationen växer kontaktytorna mellan strukturelementen, den bärande ytan ökar därmed bärförmågan vid oförändrad hållfasthet. Detta betyder att bärkraften ökar under packningens gång. Packningsförloppet upprättar i princip ett jämviktsförhållande mellan belastning och bärkraft. Bestämmande för jämviktens läge är hållfastheten (skärhållfastheten) hos jordens strukturelement. Packning sker tills den bärande ytan inom varje horisont av jordprofilen uppnått ett mot belastning och hållfasthet svarande värde. Schematiskt visas detta i figur 5 (jämför även Day & Holmgren 1952). Understiger belastningen profilens bärkraft sker ingen packning alls. Upprepade belastningar medför ingen packning utöver det uppnådda jämviktslaget. Emellertid är systemet mycket trögt, och jämvikten uppnås ej genast åtminstone vid statisk belastning. Vid upprepade belastningar närmar sig systemet sitt sanna jämviktsläge (jfr diagram 33). Dynamisk belastning upprättar jämviktslaget snabbare och säkrare, men i princip bör samma jämviktsläge ernås som vid statisk belastning.

Vi betraktar förloppet i en aggregerad lerjord under packning, när trycket så småningom ökar (figur 6). Först sker en tryckuppbyggnad utan packning. När profilens bärkraft överstiges, påbörjas omlagringar och deformationer av aggregaten. Först sammanpressas de största porerna mellan aggregaten. Ju mindre poren är, desto större tryck behövs för att påverka den. Därför berörs, när trycket ökar successivt, allt mindre porer. Under denna del av förloppet är volymvikten eller porositeten åtminstone approximativt en rätlinjig funktion av logaritmen för trycket. När kompressionen gått så långt att så gott som endast vattenfyllda porer återstår, påförjas ett annat förlopp. Vattnet upptar huvuddelen av trycket och pressas ut ur tryckzonen. Det är en långsam process, vars hastighet bestäms av bl.a. jordmaterialets permeabilitet. Förloppet kallas konsolidering och ägnas stor uppmärksamhet i geotekniska sammanhang. Vid så kortvariga belastningar som det är fråga om i jordbrukets maskindrift kan man i de flesta fall räkna med att packning genom konsolidering ej förekommer. Den maximala förtätningsbara volymen utgöres då av volymen luftfyllda porer.

Deformationen av aggregaten sker genom plastisk flyttning eller genom sönderbrytning, huvudsakligen i kontaktytorna, dit krafter koncentreras (jfr fig. 5). Just i kontaktytorna kan också jordens mikrostruktur beröras. Ältning, dvs. uppbrytning av den ursprungliga mikrostrukturen och orientering av lerpartiklarna i en och samma riktning, kan där inträffa om vattenhalten ej är alltför låg. Detta gör att gränsytorna mellan aggregaten försvinner, sammanhanget i jorden ökar, och större strukturenheter bildas. Lerjordar som skadats på detta sätt brukar kännetecknas av att ett glest nät av stora sprickor bildas vid upptorkning. Oftast är ältning, där den förekommer, begränsad till kontaktzonerna mellan aggregaten och endast en liten del av jordvolymen berörs. Vid extremt stark packning, särskilt i samband med slirning och upprepade körningar, kan dock mera omfattande strukturskador uppstå.

De förlopp, som här angetts ligga bakom packningen, nämligen plastisk deformation, partikelomlagring och sönderbrytning, är icke reversibla. Likväl är packningen i viss, om än obetydlig, grad reversibel. Jorden är något elastisk. När trycket upphört sker en viss ökning av porositeten, en viss höjning av markytan. Detta kan bero på att en del av belastningen uppbäres av elastiska kemiska bindningar, som speciellt finns i organisk substans. Innesluten luft och möjligen spänningen i vattenmeniskerna kan också medverka till denna elasticitet.

6. Modellens tillämpning i fält.

Trots att den skisserade modellen enbart är en hypotes, skall möjligheten av att tillämpa den i fält och några konsekvenser därav ändå beröras. Det bör observeras att resonemanget gäller plastiska jordar, dvs jordar med lerinslag. För rena sand- och mojordar gäller troligen andra förhållanden.

Här har pekats på tämligen lagbundna samband mellan tryck och porositet. Men även om ett sådant samband verkligen kan bevisas generellt gälla för en viss jord under bestämda förhållanden, kan det inte utan vidare användas för att kvantitativt beräkna den packningseffekt en viss behandling åstadkommer i fält. Sambandet gäller för homogena volymselement, ej för medelvärden. Detta kan åskådliggöras genom följande exempel:

Tre försöksrutor A, B, och C packas med traktor. Teoretiska volymvikten efter packning i ett visst lager är $1,30 \text{ g/cm}^3$ (jämviktsläget enligt χ -p-funktionen). Två parallella volymviktsbestämningar göres på varje ruta före packningen. Resultat:

Volymvikt före packning			
	A	B	C
	1,30	1,40	1,50
	1,30	1,20	1,10
Medel- värde	1,30	1,30	1,30
Teoretisk volymvikt på samma punkter efter packning			
	1,30	1,40	1,50
	1,30	1,30	1,30
Medel- värde	1,30	1,35	1,40

Jordlagrets medelvolymvikt kan ej förutsägas, men väl den maximala verkan belastningen kan ha i varje enskild punkt. Exemplet visar också en av packningens följdverkningar: jordens homogenitet ökas.

Försöken har utförts med matjord, som legat i öppet bruk några år. Måhända är det möjligt att för en sådan jord bestämma ett samband mellan pålagt tryck och porositet vid olika vattenavförande tryck som gäller någorlunda allmänt just på den lokalen. Struktur, biologisk aktivitet, kolloidernas jonbesättning m.m. inverkar på

packningsbenägenheten, men på en viss lokal kanske dessa faktorer är tillräckligt konstanta för att försvara en viss generalisering. I så fall kunde man ha praktisk nytta av en χ -p-funktion. I jordar som får ligga orörda några år, (vallar, alvjordar) förstärkes emellertid efterhand bindningarna inom och mellan strukturelementen, varigenom hållfastheten ökar med tiden. Dessutom ökas elasticiteten och hållfastheten genom rotgenomvävningen. Sådana jordar kan vara mycket mera motståndskraftiga mot packning än motsvarande jordar som regelbundet bearbetas.

Den volymvikt (porositet) som bestämts i försöken och som kan beräknas enligt modellen gäller omedelbart efter packning (vattenhalten oförändrad). Detta kan, som påpekats i ett föregående avsnitt, vara ett otillräckligt mått på de förändringar som åstadkommes i jorden. Skadas aggregatstrukturen minskas porositeten starkt vid en följande upptorkning, och denna porositetsminskning har inget samband med den som uppstått vid packningstillfället. Däremot bör den vara beroende av den energimängd (slirning, ältning, antal körningar) som jorden fått upptaga vid packningen.

Enligt modellen kan en viss belastning ej minska porositeten utöver jämviktsvärdet oberoende av antalet körningar. Körning i samma spår flera gånger skulle alltså ej ytterligare minska porositeten. Detta kan i princip vara riktigt, men det är troligt att den packade jordmängden i viss mån ökas med antalet körningar. Tryckutbredningen i jordprofilen förändras genom packningen, så att mera perifera jordlager successivt påverkas vid upprepade körningar. Dessutom sker efterhand en justering mot jämviktsläget mellan tryck och porositet, och denna justering är tillräckligt stor för att vara av praktisk betydelse. Vidare, om vattenhalten är sådan att ältning sker, bör skadeverkan ökas med antalet körningar oberoende av om porositetsminskning uppstår.

Mot en viss porositet svarar enligt modellen en viss bärkraft. En belastning, som understiger denna bärkraft har ingen inverkan på porositeten. Under ett visst "tröskelvärde" för effektiva marktrycket skulle alltså ingen packning ske. Detta tröskelvärde bestäms av jordens aktuella porositet, och fås teoretiskt om man insätter detta värde i de gällande sambandet mellan porositet och tryck. Det bör dock observeras, att detta "tröskelvärde" ej kan tillämpas på medelporositeten hos ett jordlager med ojämn struktur, utan det gäller för enskilda volymselement eller lager med homogen makrostruktur. Den refererade undersökningen ger en anvisning om storleken av detta tröskelvärde. Volymvikts- och vattenhaltsvärden vid vårbrukets början hämtas ur diagram 1 - 4, korresponderande porositet ur diagram 29 - 32. Då erhålles värden i intervallet $0,4 - 1,0 \text{ kp/cm}^2$ (om man undantar ett extremvärde i diagram 30). Korresponderande tryck kan även hämtas ur diagramserien 9 - 28. Då får man högre värden: $0,75 - 1,5 \text{ kp/cm}^2$. Värdena från fältundersökningen (diagram 29 - 32) får anses vara mest relevanta. Dras konsekvenserna ut blir resultatet att ett marktryck av $0,5 \text{ kp/cm}^2$ eller därunder vid tiden för vårbrukets början knappast packar jorden alls på de fyra lokaler som undersökts. Medelporositeten bör dock minskas något genom att mycket lösa partier av jordlagret packas. Vidare ökas jordens homogenitet.

7. Sammanfattning.

Packningsbenägenheten hos olika jordar undersöktes med hjälp av en laboratoriemetod av typen "confined compression test".

Maximal packningsbenägenhet på våren erhöles först efter en viss upptorkning, och detta känsliga stadium sammanföll ungefär med tiden för vårbrukets början. Det betonas, att den omedelbara minskningen i porositet genom packning på lerjordar ger ett otillräckligt mått på den strukturpåverkan som skett. Strukturskadan ger sig ofta till känna först senare under upptorkningen.

Hög mullhalt i jorden leder till minskad packningsbenägenhet. Likaså påvisades, att mikrobiell omsättning i jorden ökar motståndskraften mot packning.

Sambandet mellan jordens volymvikt och pålagt tryck närmade sig vid ökande tryck alltmera en funktion av typen:

$$\chi = c \log p + k$$

där alltså volymvikten (eller porositeten) är en rätlinjig funktion av logaritmen för trycket. En hypotetisk modell för packningsförloppet i en aggregerad plastisk jord, vari ovanstående samband ingår som ett led, diskuteras och några konsekvenser av modellens tillämpande i fält behandlas.

8. Litteraturförteckning

- ASAE Soil Compaction Committee Report. 1958.
Transactions of the ASAE 1, 1958.
- Becker, C.F. 1959. Soil Compaction pressures under rolling press wheels. Transactions of the ASAE 2, 63-70.
- Bekker, M.G. 1956. Theory of Land Locomotion. Ann Arbor, The University of Michigan Press, p. 103-159, 232-282.
1960. Off the road locomotion. Ann Arbor, The University of Michigan Press, 220 pp.
- Bodman, G.B. och Constantin, G.K. 1965. Influence of Particle Size Distribution in Soil Compaction. Hilgardia 36, 567-591.
- Bruce, R.R. 1955. An Instrument for the Determination of Soil Compactibility. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19, 253-257.
- Canarache, A. 1965. Les facteurs de la résistance mecanique des sols et les methodes utilisées pour les etudier. Science de sol 2, 89-107.
- Cooper, A.W. och Nichols, M.L. 1959. Some Observations on Soil Compaction Tests. Agricultural Engineering 40, 264-267.
- Day, P. och Holmgren, G. 1952. Microscopic Changes in Soil Structure during Compression. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16, 73-77.
- Domsch, M. 1954. Forderungen des Ackerbodens an Schleppergewichte und Schlepperreifen. Deutsche Agrartechnik 4:12, 345-351.
- Ermich, D. 1957. Untersuchungen über die verdichtbarkeit von Ackerböden. Die Deutsche Landwirtschaft 8, 401-405.
- Fehl, A.J. och Lange, W., 1965. Soil stabilization by growth of microorganisms on high-calorie mold nutrients. Soil Sci. 100, 368-372.
- Fergedal, L. 1964. Fältförsök med olika packningsgrader på styv lera. Examensarbete i Allmän Jordbrukslära. Lantbrukshögskolan, Uppsala.
- Fiedler, H.J. 1964. Die Untersuchung der Böden. Band 1. Dresden och Leipzig.
- Feuerlein, W. 1961. Zum Einfluss der Schlepperrads auf den Acker. Landbauforschung 3, 69-72.
- Fountaine, E.R. och Payne, P.C. 1952. The effect of tractors on volume weight and other soil properties. NIAE Report C 8 17.
- Gerard, C.J. 1965. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29, 641-645.
- Gliemeroth, G. 1953. Untersuchungen über verfestigungs- und Verlagerungsvorgänge im Ackerboden unter Rad- und Raupenfahrzeugen. Z. F. Acker- und Pflanzenbau 96, 219-234.

- Heinonen, R. 1961. On the pretreatment of samples of heavy clay soil for determinations by the pressure membrane apparatus. Maatalous-tieteellinen Aikakauskirja 33, 153-158.
- Hovanseian, J.D. och Buchele, W.F. 1959. Development of a recording volumetric transducer for studying effects of soil parameters on compaction. Amer. Soc. Agr. Engin. ASAE 2 (1), 78-81.
- Hutter, W. 1966. Action des compressions sur la structure d'un sol. Ann. agronomiques 17, 37-52.
- Kawano, Y. och Homes, W.E. 1958. Compaction tests as a means of soil structure evaluation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22, 369-372.
- Koenigs, F.F.R. 1961. The mechanical Stability of Clay Soils as influenced by the Moisture Conditions and some other Factors. Verslagen von Landbouwkundige onderzoekingen, Wageningen, 67:7, 103-111.
1963. The puddling of clay soils. Neth. J. Agric. Sci. Vol. 11, nr 2.
- Krynine, D. 1941. Soil Mechanics. Mc Graw - Hill Book Company, New York - London, 89-197.
- Kuipers, H. 1959. Confined Compression Tests on Soil Aggregate Samples. Mededelingen van de Landbouwhogeschool en de Opzoekingsstation van de Staat te Gent 24, 349-357.
- Nichols, M.L. och Reaves, C.A. 1955. Soil Structure and Consistency in Tillage Implement Design. Agricultural Engineering 36, 517-522.
- Pohjakas, K. 1966. The effect of soluble salts on the compactivity of four Saskatchewan soils. Can. J. Soil Sci. 46, 47-52.
- Potapov, B.J. 1966. Influence of moisture content and soil compaction on the soil's maximum shear strength. Soviet Soil Sci. 1966, 4, 396-398.
- Proctor, R.R. 1933. On Construction of rolled - earth dams. Engineering News - Record 3, 286-289.
- Reaves, C.A. och Nichols, M.L. 1955. Surface soil reaction to pressure. Agricultural Engineering 36, 813-820.
- Rid, H. 1956. Neue Untersuchungsergebnisse zur Frage Bodendruck. Bayer. Landw. Jb. 2, 145-157.
- Rosenak, S. 1963. Soil Mechanics. London 1963.
- Söhne, W. 1952. Die Verformbarkeit des Ackerbodens. Grundlagen der Landtechnik 3, 51-59.
1955. Die Verdichtbarkeit des Ackerbodens unter Berücksichtigung des Einflusses organischer Bestandteile. Z. f. Pflanzener-nähr., Dung., Bodenkunde 69/70, 116-125.

- Vanden Berg, G.E. 1962. Requirements for a soil mechanics. Transactions of the ASAE 4, 242-245.
- Vomocil, J.A., Foutaine, E.R. och Reginato, R. 1958. The influence of speed and drawbar load on the compacting effect of wheeled tractors. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22, 178-180.
- Weaver, H.A. och Jamison, V.C. 1951. Effects of Moisture on tractor tire compaction of soil. Soil Sci. 71, 15-23.

DIAGRAM 1.

Resultat av kompressionsprov, öndvärppar från Palt.

Sambandet mellan vattenhalt, ursprunglig volymvikt (γ_1) och volymvikt efter kompression (γ_2). Tryck 2,0 kp/cm².

Varje punkt är medeltal av 10 parallellbestämningar.

Volymvikt

8 A

Styv lera från Lilla Sunnersta, nordö försöket.

Öpackat led (b)

x x x

Tidigt packat led (b) o o o

1,7

1,6

1,5

1,4

1,3

1,2

1,1

20

25

30

LPL

10

5

0,5

Vattenhalt
vikt-%

Motsv.
vattenhalt
tryck,
n vp

Uppskattad
tidskala
mfr. till
led b.

20/6

31/5 11 5

1/5 28

25/4

966

DIAGRAM 2.

Resultat av kompressionsprov, pröyproppar från Kält.

Sambandet mellan vattenhalt, ursprunglig volymvikt (γ_v) och volymvikt efter kompression (γ_p). Tryck 2,0 kp/cm².

Varje punkt är medeltal av 10 parallellbestämningar.

Lätt mellanlura från Lilla Sannhersta, övre försöket.

Volymvikt

Opackat led (b)

Tidigt packat led (a)

γ_p (strecklinjer)

γ_v (heldragna linjer)

Vattenhalt
i vikt-%

Motsvarande
vattenhalt
tryck, n. p.

Ungfärdig
tidsskala
ref. till
led F.

17/5 10 6 2/5 29/4 27/4 1966

DIAGRAM 3.

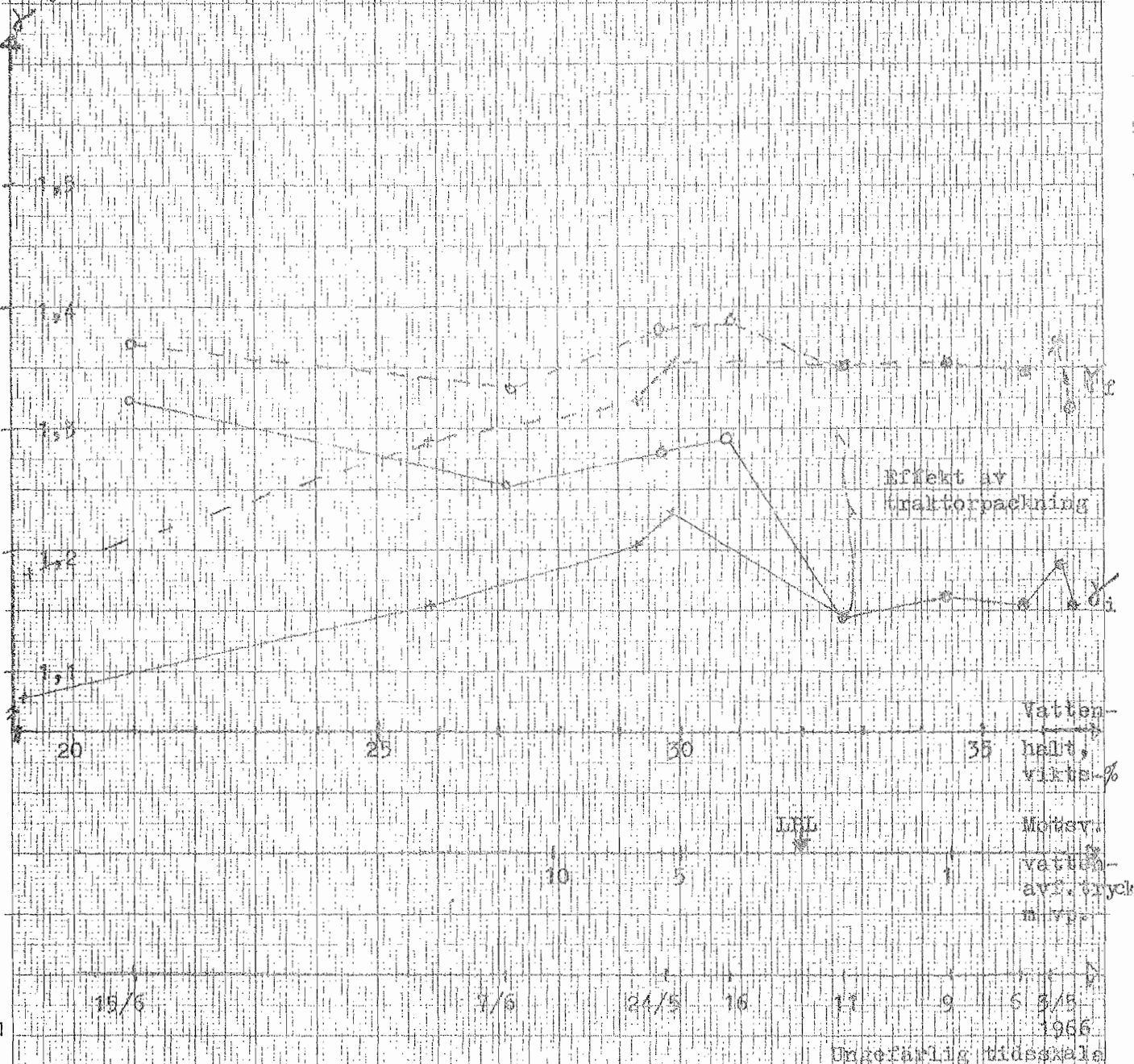
Resultat av kompressionsprov, provdroppar från Helt.

Sambandet mellan vattenhalt, ursprunglig volymvikt (V_1) och volymvikt efter kompression (V_2). Tryck 250 kp/cm².
Varje punkt är medeltal av 10 parallellbestämningar.
Lerig mo från Säby.

Opäckt led (10) — — — — —

Packat led (11) — — — — —

Volymvikt



514 A4
73 25 01

(LULBERG
RST
KLIPPA)

r 1624

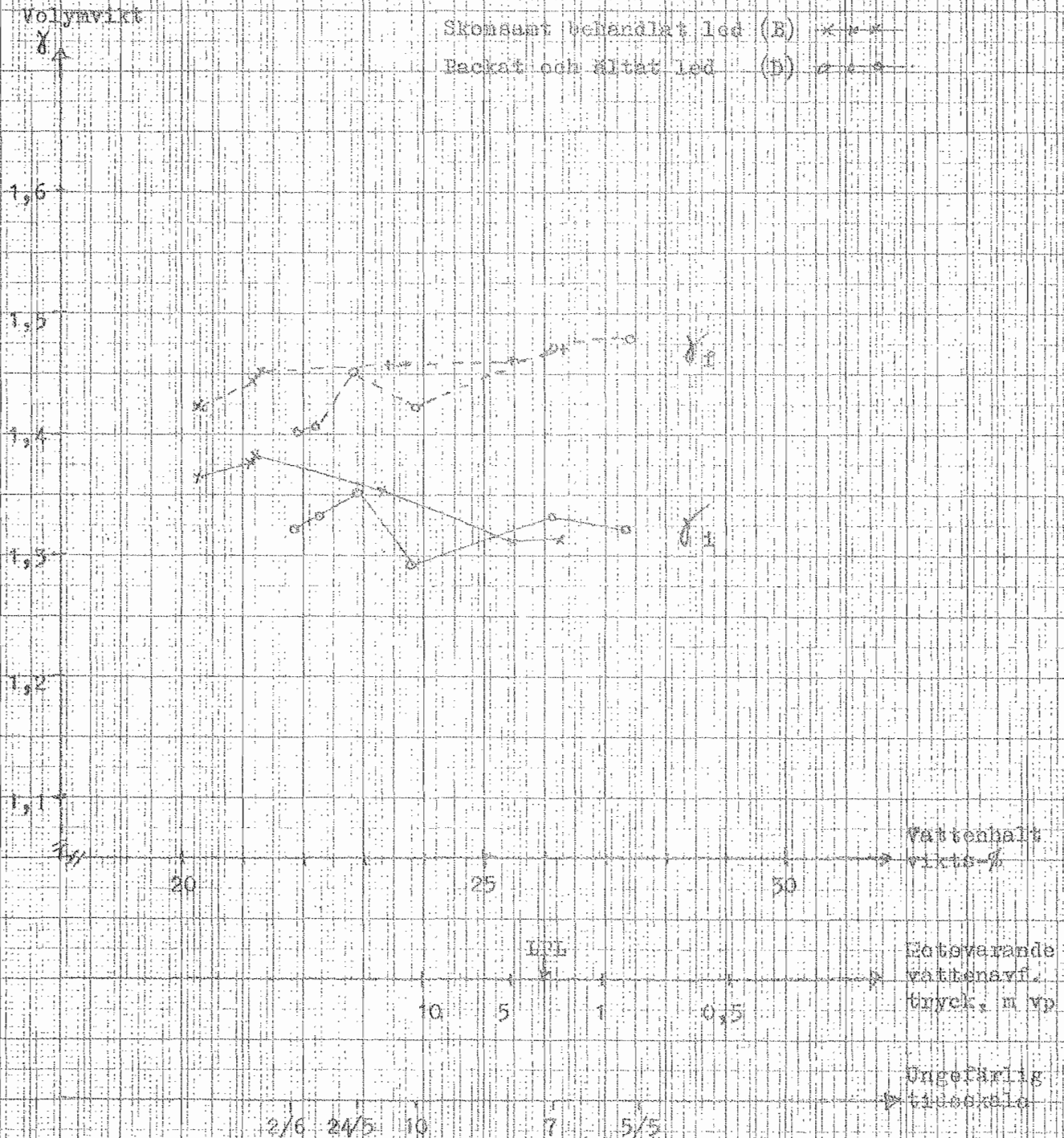
DIAGRAM 4.

Resultat av kompressionsprov, provoröppar från fält.

Sambandet mellan vattenhalt, ursprunglig volymvikt (γ_1) och volymvikt efter kompression (γ_2). Tryck 2,0 kp/cm².

Varje punkt är medeltal av 10 parallellbestämningar.

Mjällig molattlera från Fredänge, Tierp.



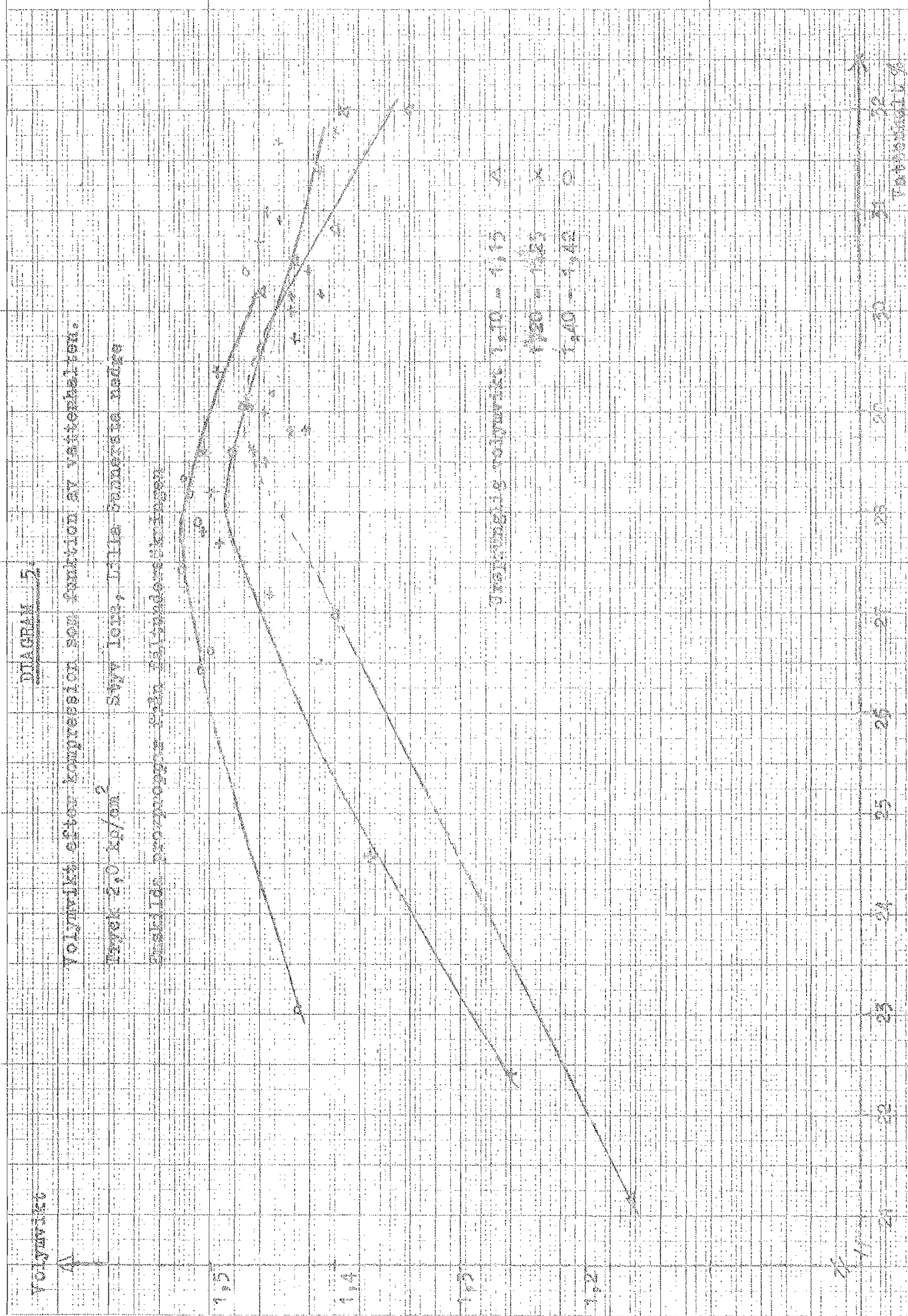


DIAGRAM 6.

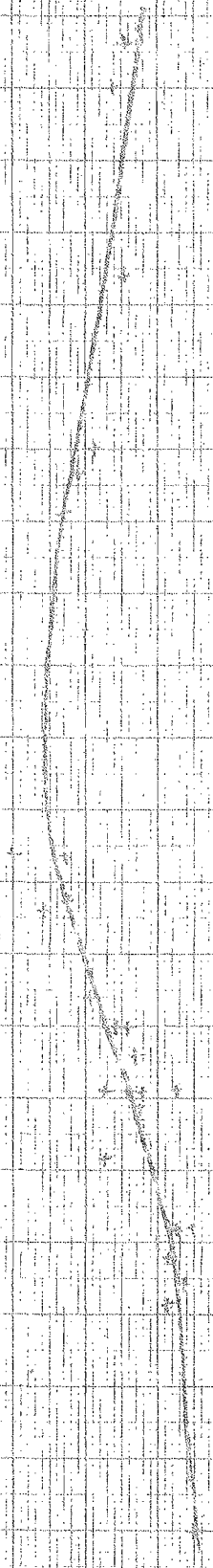
Volymvikt efter kompression som funktion av vattenhalten.

Tryck: 2,0 kp/cm²

Stätt mottagarna, låtla bumerstas övre.

Enskilda provproppar från fältsundersökningen

Ursprungliga volymvikt: 1,50 = 1,52



Volymvikt

Vattenhalt %

DIAGRAM 7

Polymvikt efter kompression som funktion av vattenhalten.

Tryck 2,0 kg/cm²

Lexig no. 3aby.

Maskilda provproppar från fältundersökningen.

01

Polymvikt

1,5

1,4

1,3

1,2

1,1

1,0

18

20

25

30

35

40

Vattenhalt %

Uppruntlig polymvikt 1,10 = 1,13

1,25 = 1,27

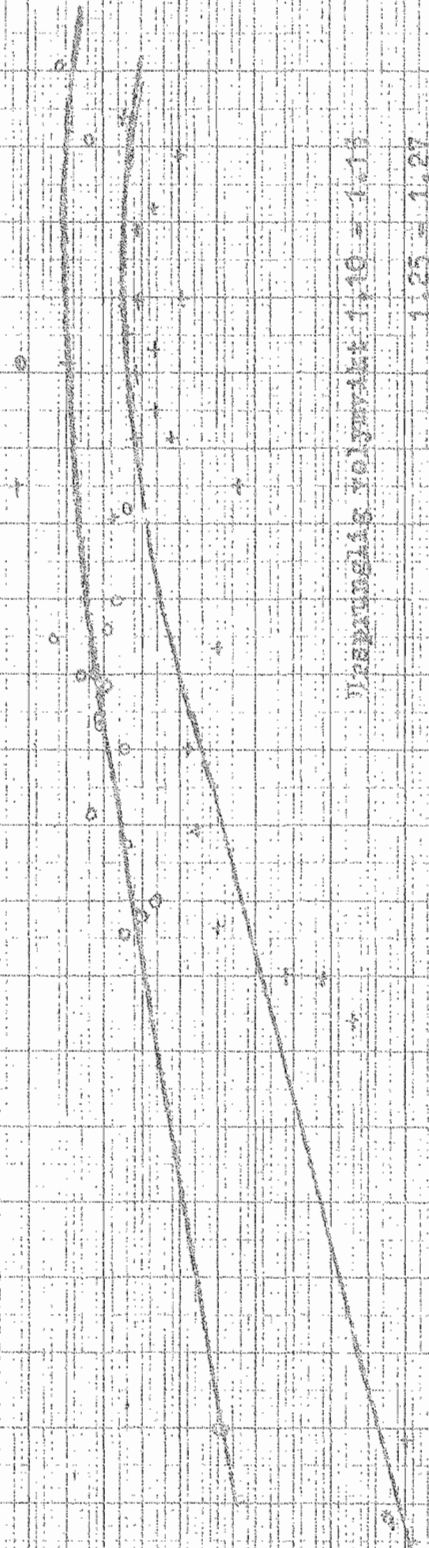


DIAGRAM 3

Volymvikt efter kompression som funktion av vattenhalten.
Tryck 20 kg/cm² Njällig molekyler, Sredänge, Vierp.

Enskilda mörgropar från rållunderökningsen

Begränsad volymvikt 1,30 - 1,32

Volymvikt

1,3

1,04

1,3

1,2

1,3

20

30 Vattenhalt %

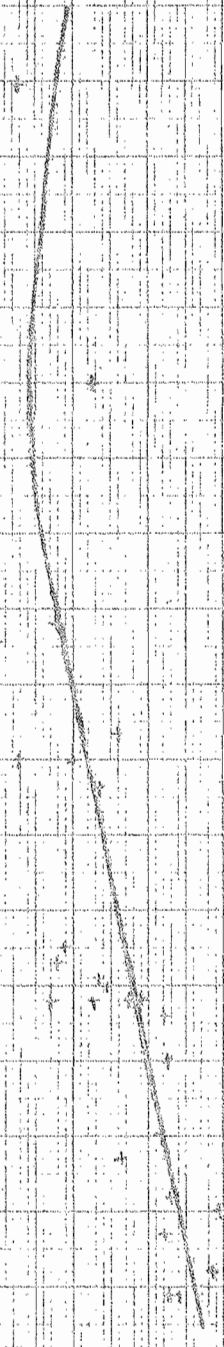
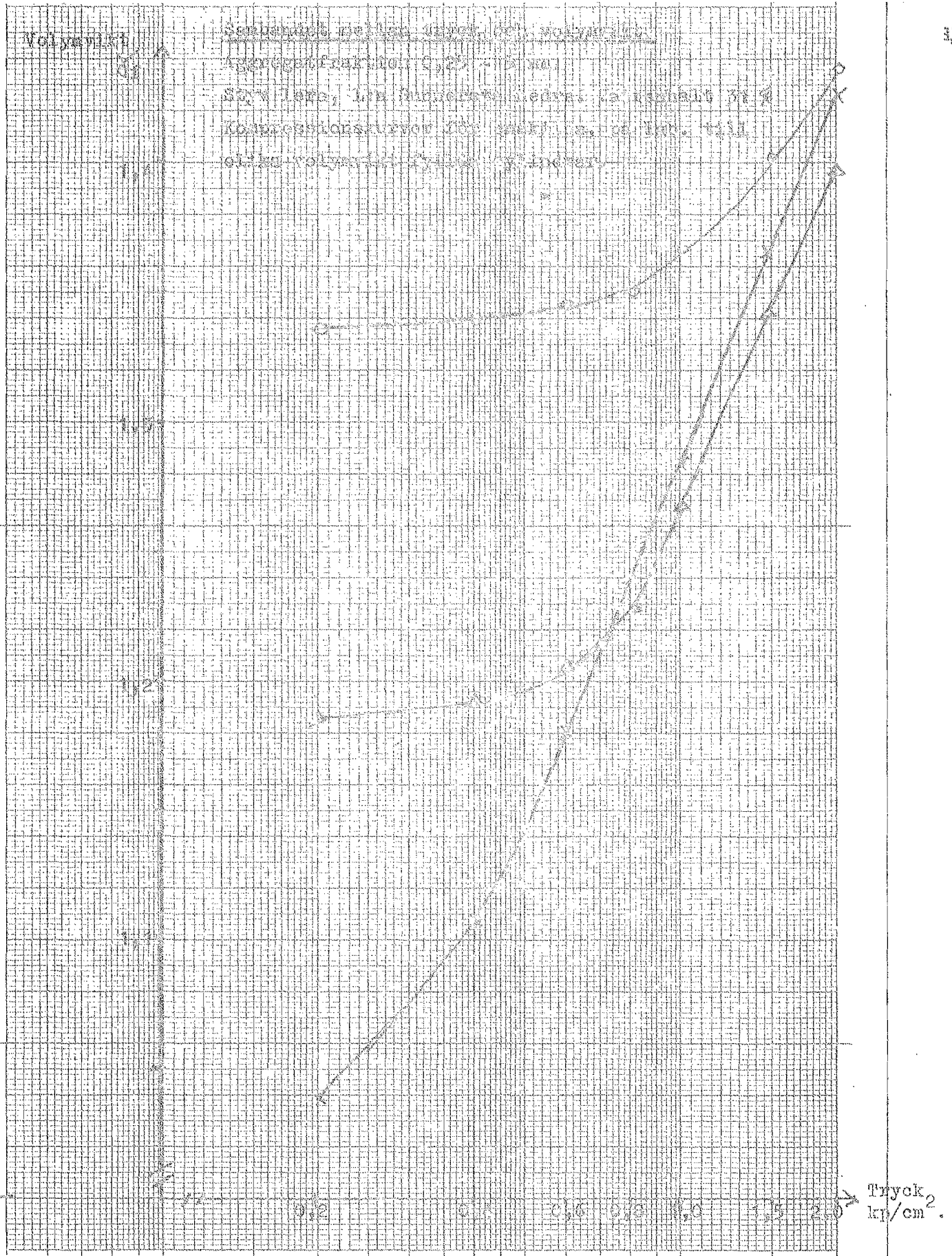


DIAGRAM 9.

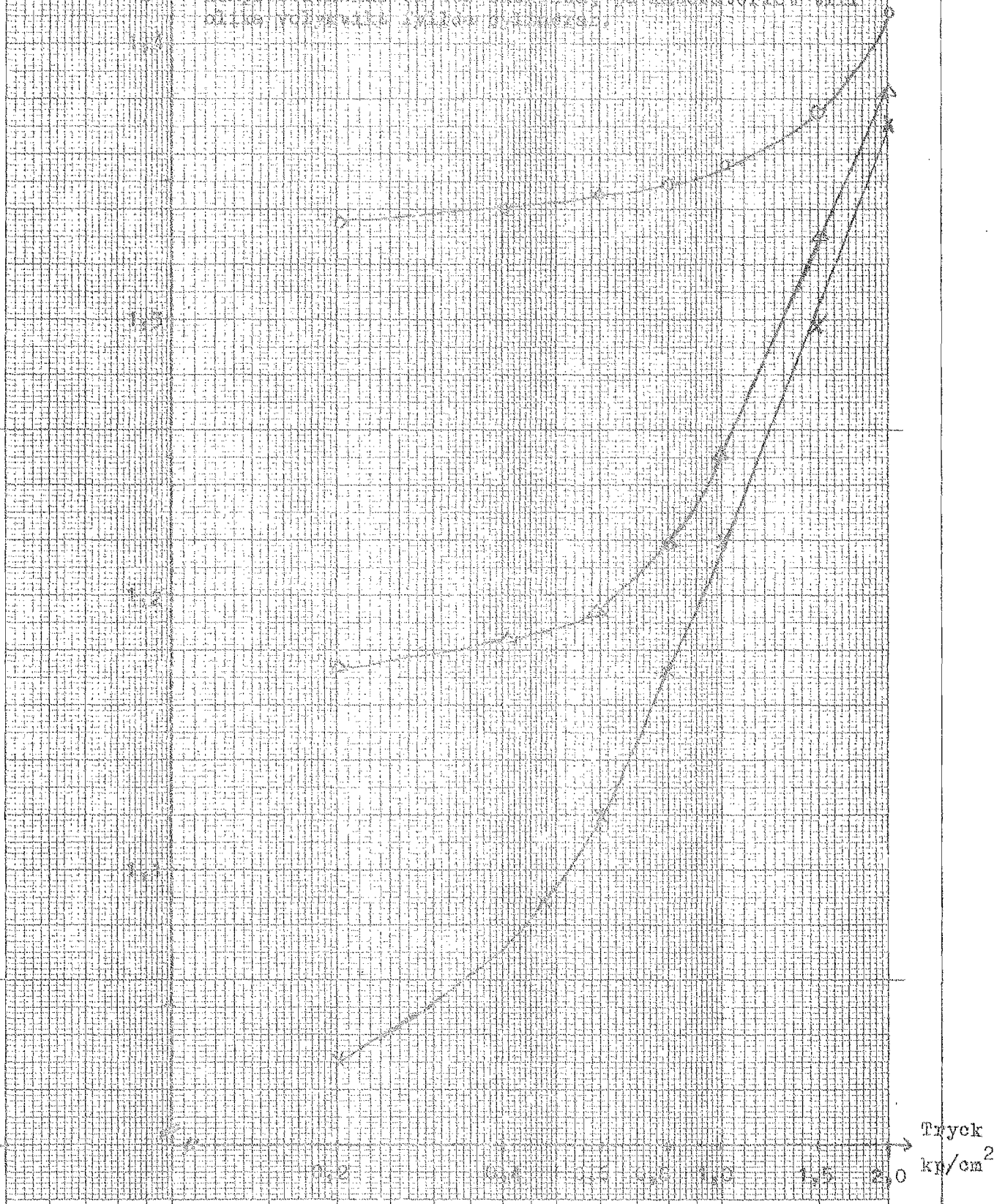


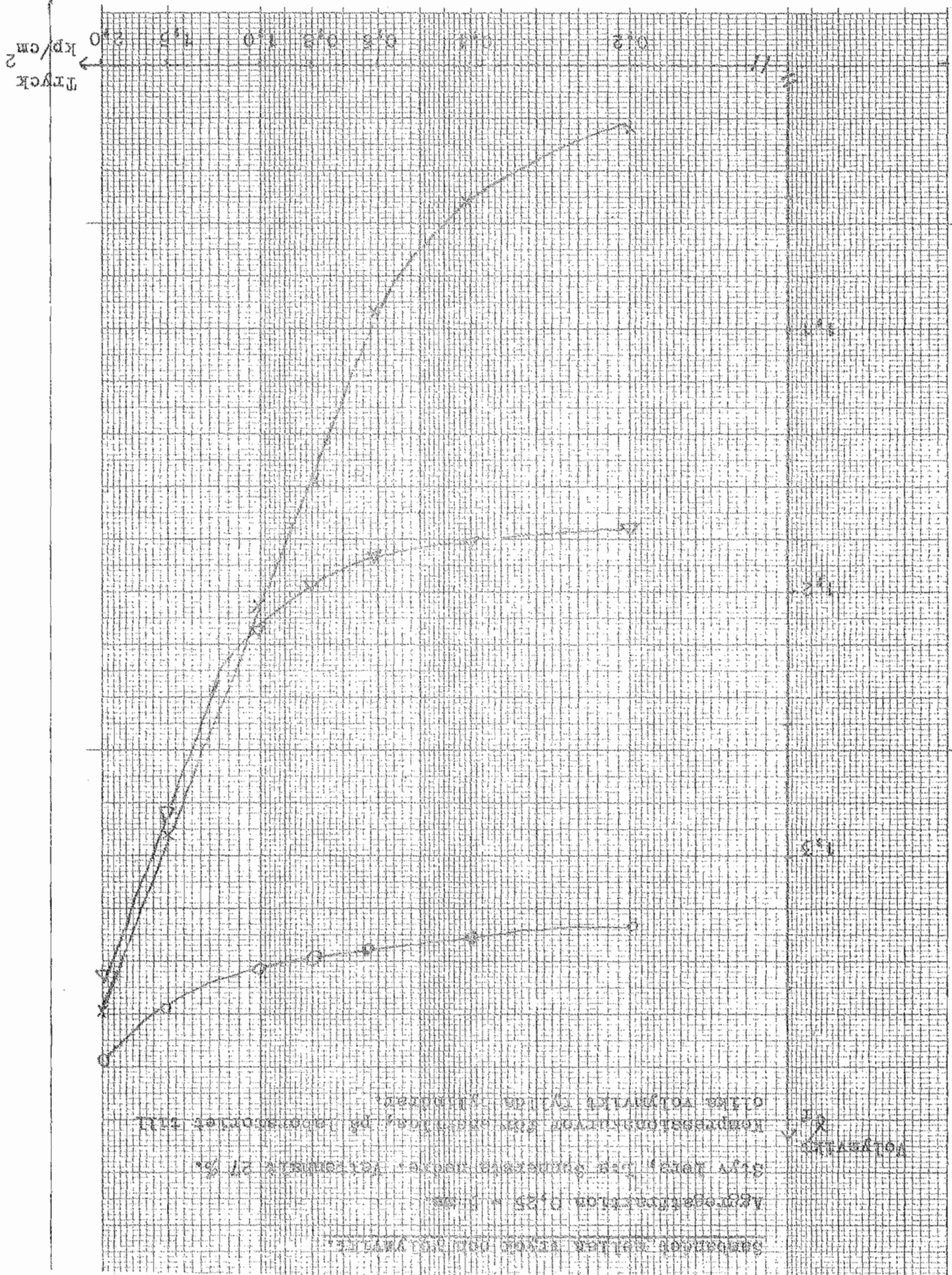
Standard test on type 100 polymer.

Temperature 0.25 - 1.00.

Dry film, 1.5 mm thick, 1.5 mm wide, 1.5 mm high.

Compressive strength for cast film, as determined by the following method.

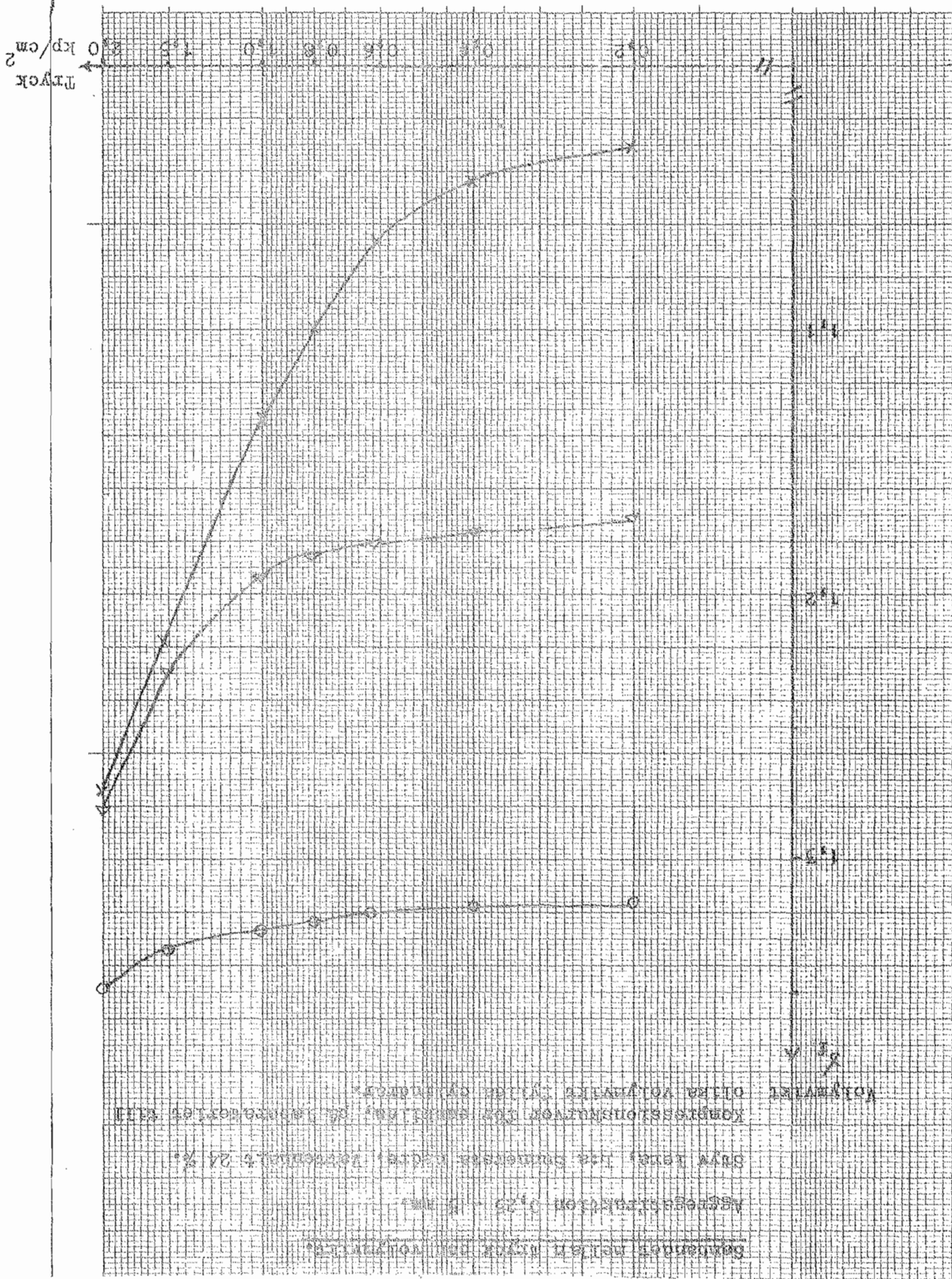




Среднее время отрыва 0.25 - 0.35 сек.
 Вывод: при данной нагрузке, сопротивление 27 %
 Компрессии при давлении 0.25 - 0.35 атм.
 Описательная таблица

ДИАГРАММА 11.

DIAGRAM 12.

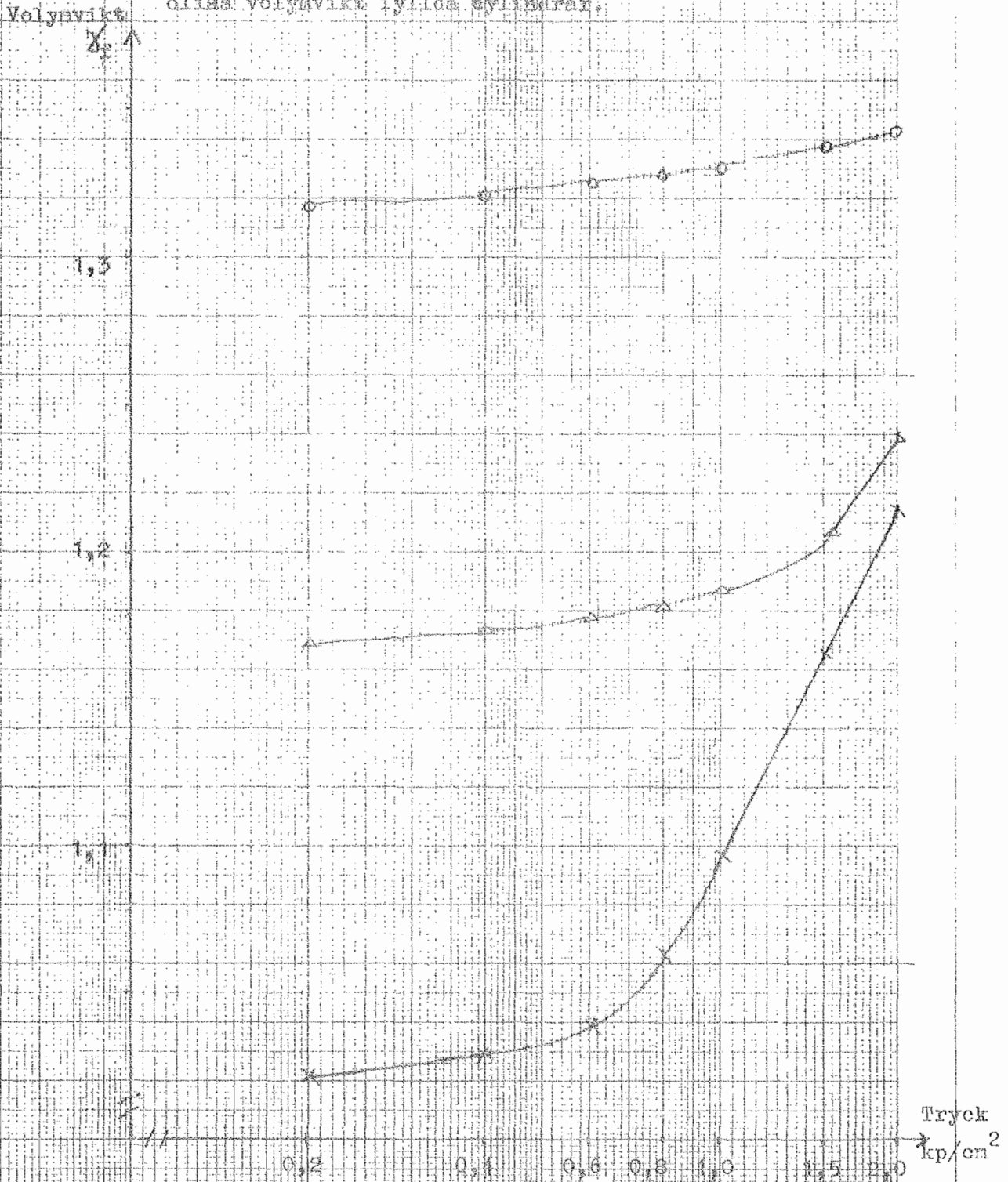


Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregation 0.25 - 5.0%

Styv leah, Lja. Summarsta nedre. Vattenhållt 22,5.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till
olika volyavikt fyllda cylindrar.



Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregatiraktion 0,25 - 5 mm.

Lätt mellanlign, Lys-Sunnersta Övre. Vattenhalt 22 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt

γ_f

1,6

1,5

1,4

1,3

1,2

1,1

Tryck
 kp/cm^2

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

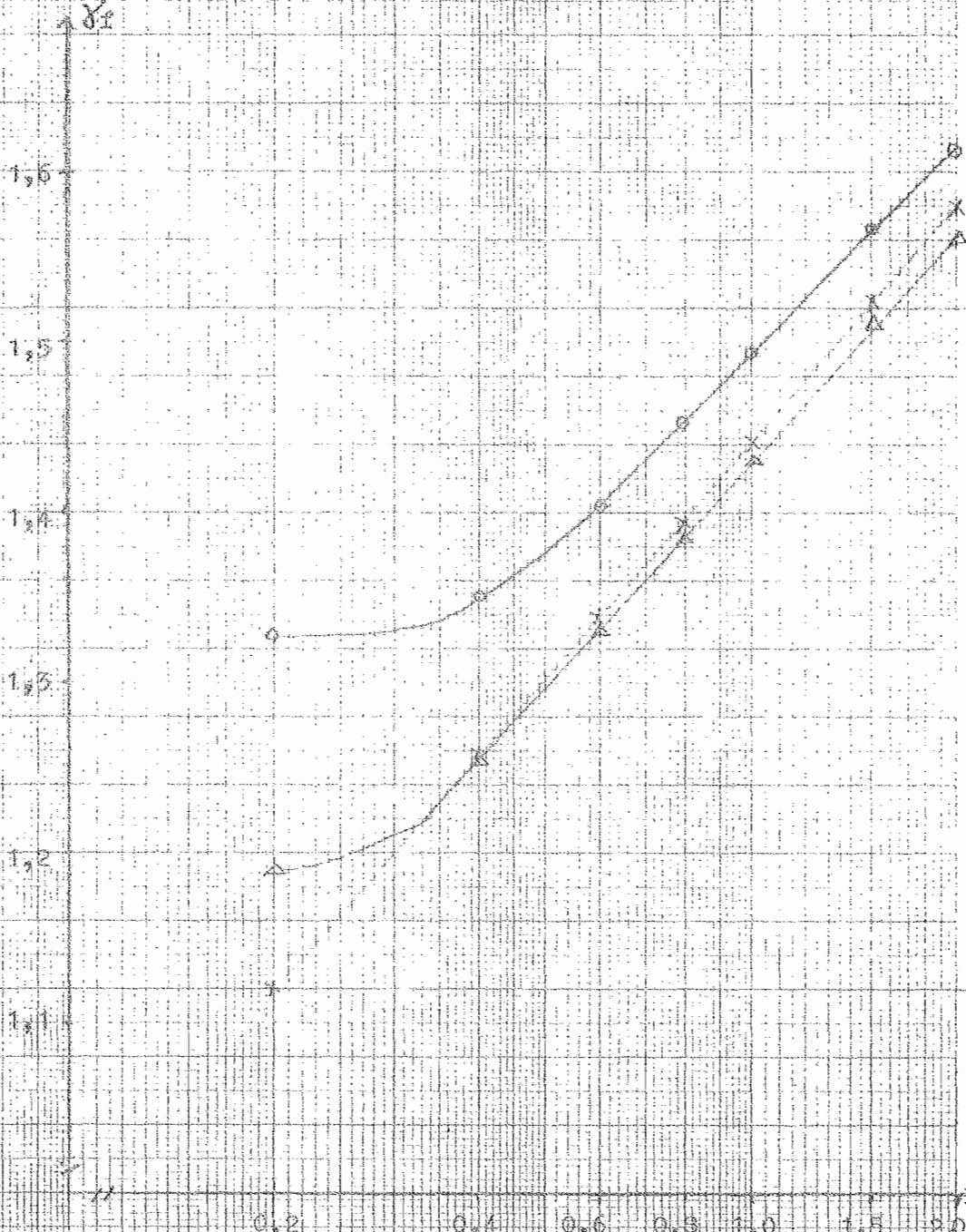


Diagram 15.

Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktionen 0,25 - 5 mm.

Lätt mellanhlera, l:a kunderska övre. Vattenhalt 19%.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt

γ_x

1,6

1,5

1,4

1,3

1,2

1,1

1

Tryck
Kp/cm²

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

DIAGRAM 16.

1944
303553

Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktionen 0,25 - 5 mm.

Lätt mellanlera, Dis Samnersta övre. Vattenhalt 17,5 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till
olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt

γ_f

1,5

1,4

1,3

1,2

1,1

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

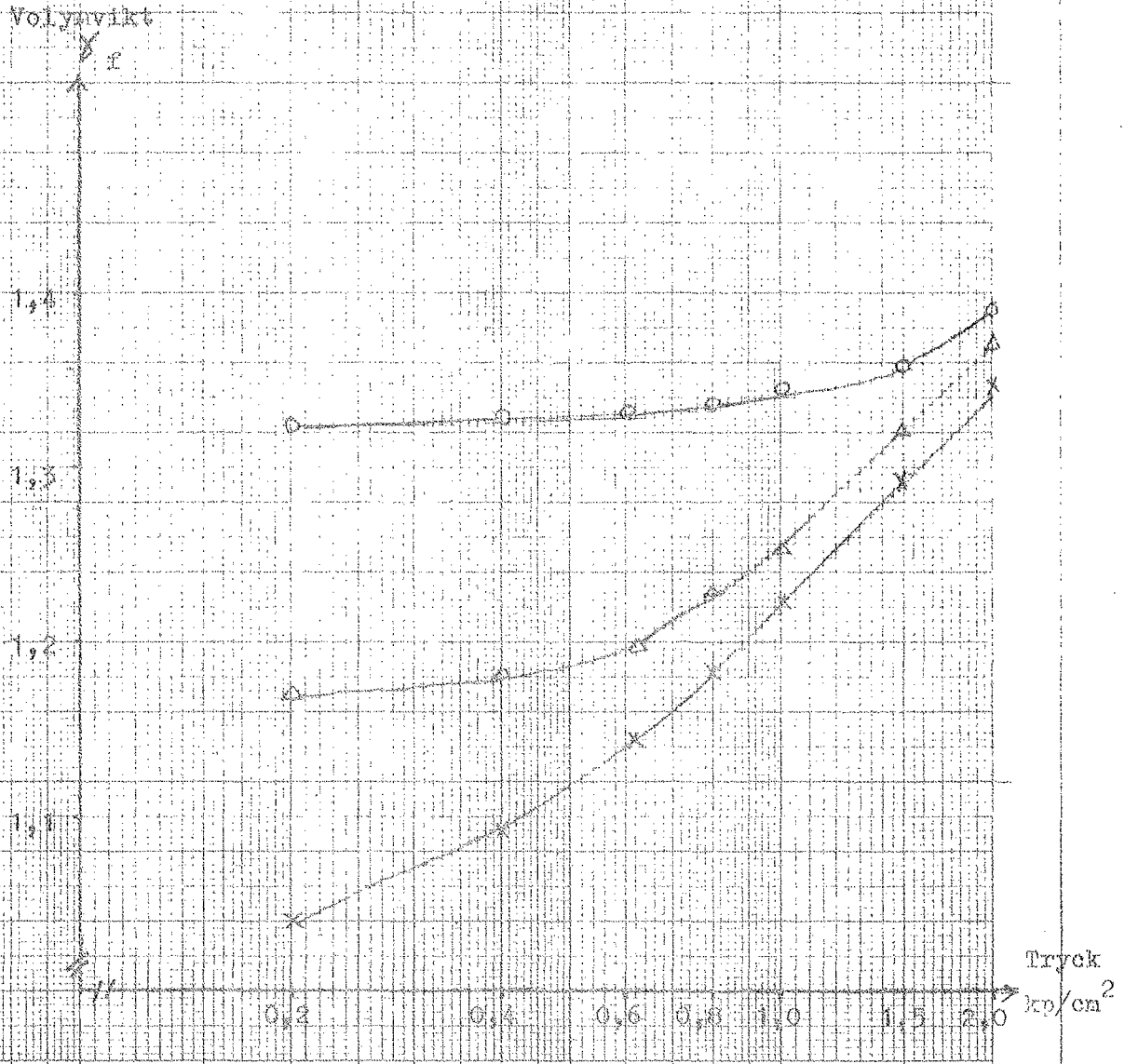
Tryck
kp/cm²

Sambandet mellan tryck och volyvvikt.

Aggregatfraktionen 0,25 - 5 mm.

Lätt mellanlera, Lra Sannersta övre. Vattenhalt 17 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till olika volyvvikt fyllda cylindrar.



Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktion 0,25 - 0,5 mm.

Lätt mellanlera, 1:a Summersta Övre. Vattenhalt 14 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till
olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt

γ_v

1,4

1,3

1,2

1,1

0,2

0,4

0,5

0,8

1,0

1,5

2,0

Tryck
kp/cm²

Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktionen 0,25 - 5 mm.

Lerig no, Säby. Vattenhalt 33 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet
till olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt
 γ_f

1,3

1,2

1,1

Tryck,
kp/cm²

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktionen 0,25 - 5 mm.

Lertig No, Saby. Vattenhalt 51 %.

Volymvikt

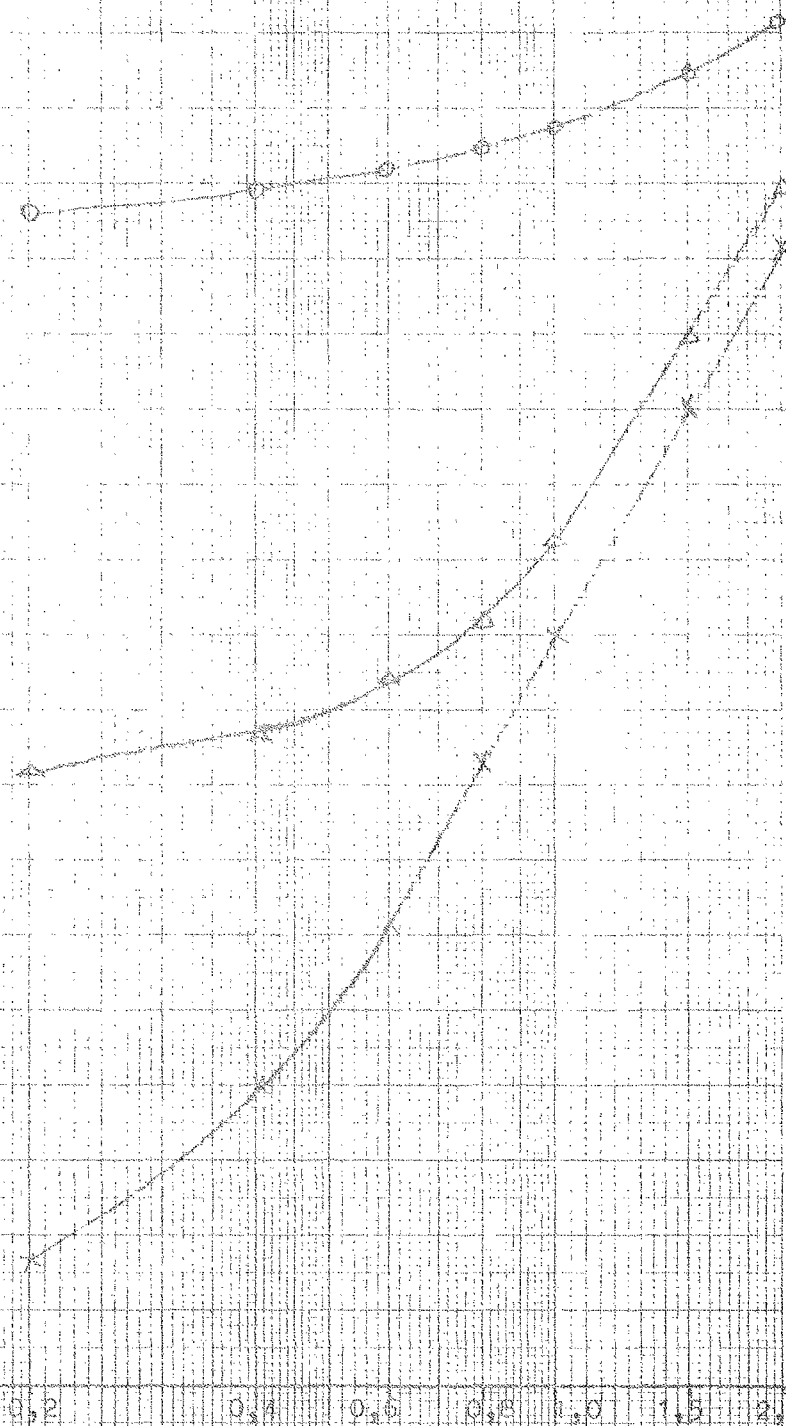
γ_r

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till
olika volymvikt fyllda cylindrar.

1,3

1,2

1,1



Tryck
kg/cm²

DIAGRAM 21.

Särbandet mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktionen 0,25 - 5 mm.

Lerig: 10, Sand: 90. Vattenhalt 29 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratorien till
olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt
 γ_r

1,3

1,2

1,1

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

Tryck
kp/cm²

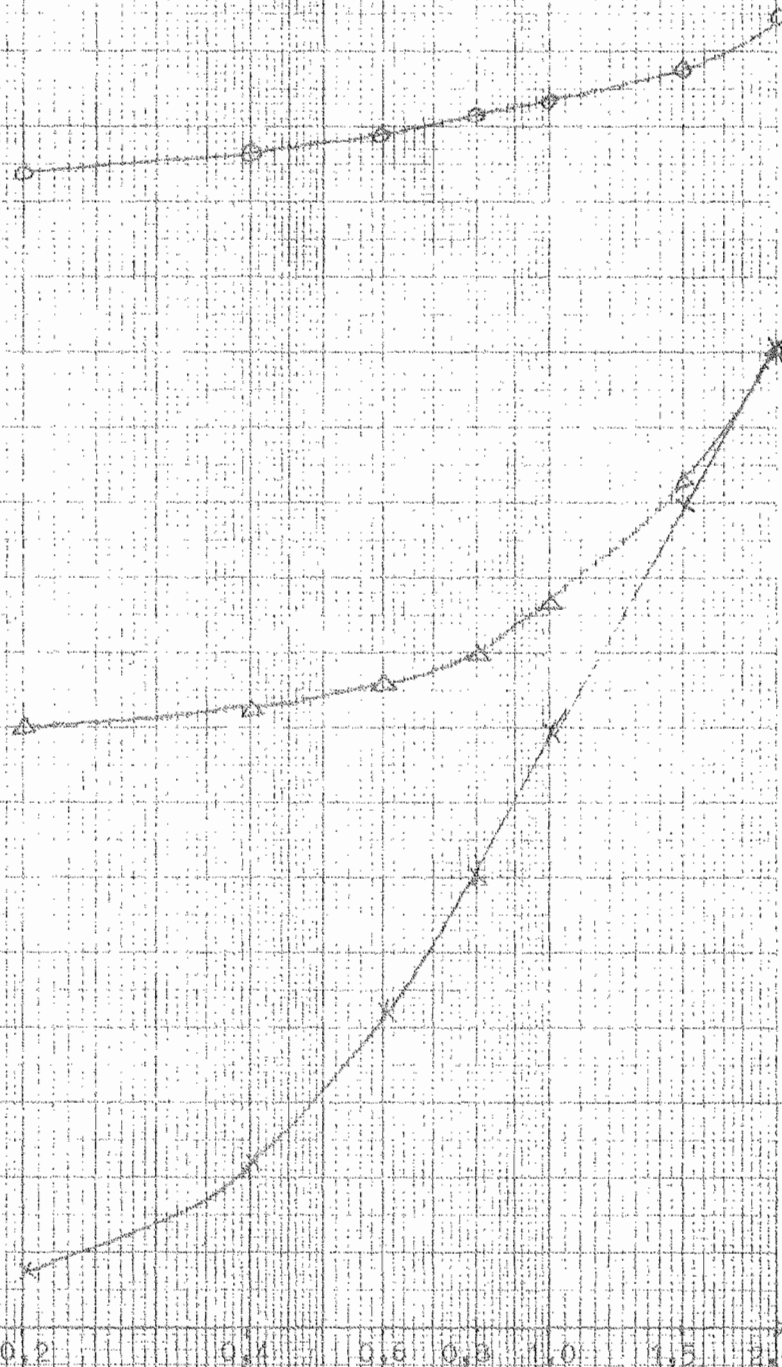


DIAGRAM 22.

Semmande mellan tryck och volymvikt

Aggregatfraktionen 0,25 + 0 mm.

Leris no. 380y. Vattenhalt 24 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till
olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt
8f

1,3

1,2

1,1

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

Tryck
kp/cm²

50

Samband mellan tryck och volymvikt

Aggregatfraktioner 0,25 - 1 mm

Horis No. 88by. Vattenhalt 19 %

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till-
olika volymvikt fyllda cylindrar.

Volymvikt

γ_t

1,3

1,2

1,1

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

Tryck
kp/cm²

DIAGRAM 24.

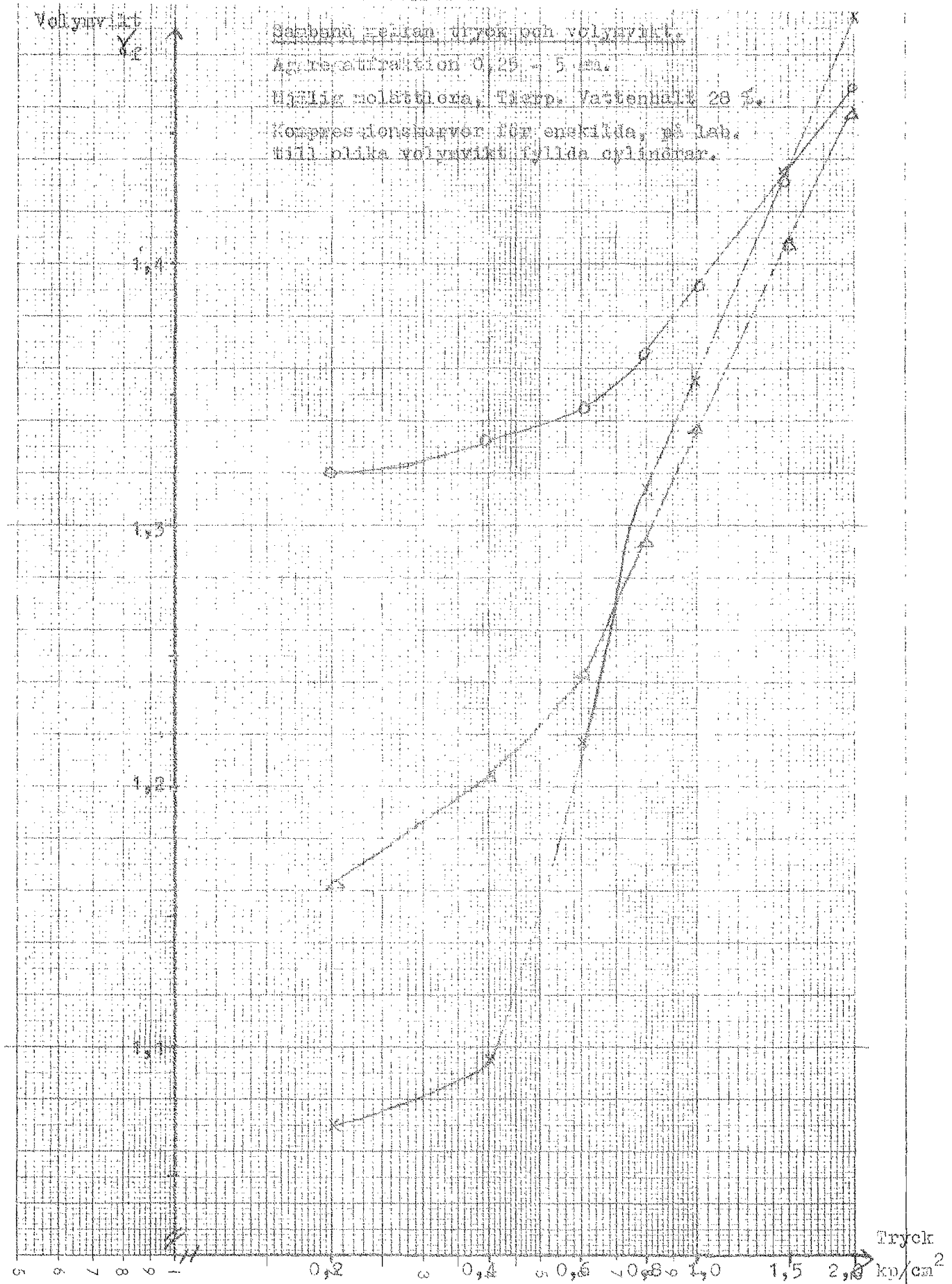


DIAGRAM 25.

Samband mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktion 0,25 - 5 mm.

Hjällig molattlera, Elorp. Vattenhalt 27 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på lab.
till olika volymvikt fyllda cylindrar.

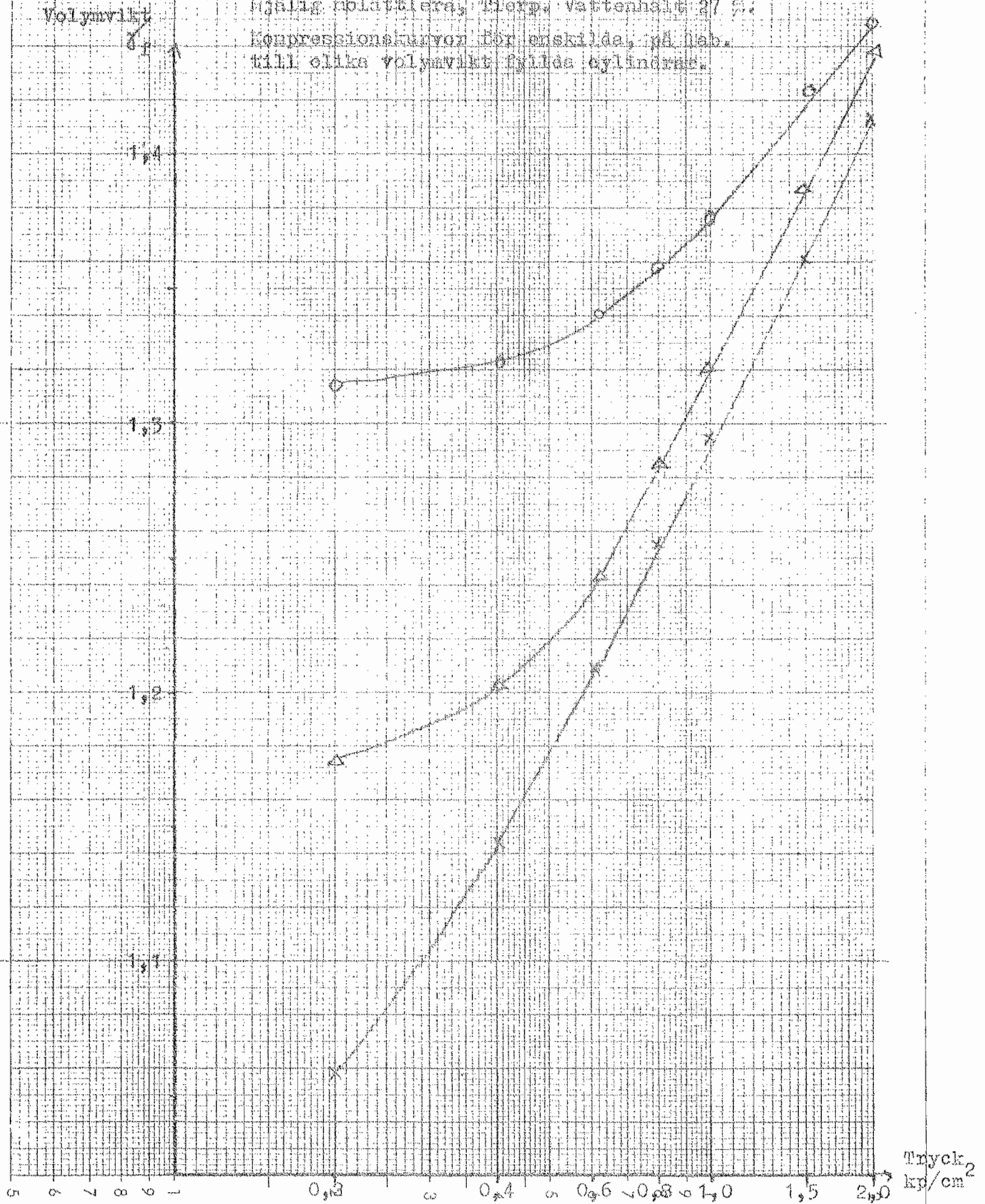


DIAGRAM 26.

Samband mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktion 0,25 - 5 mm.

Ljellig molattlera, Tierp. Vattenhalt 24 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till olika volymvikt tyllda cylindrar.

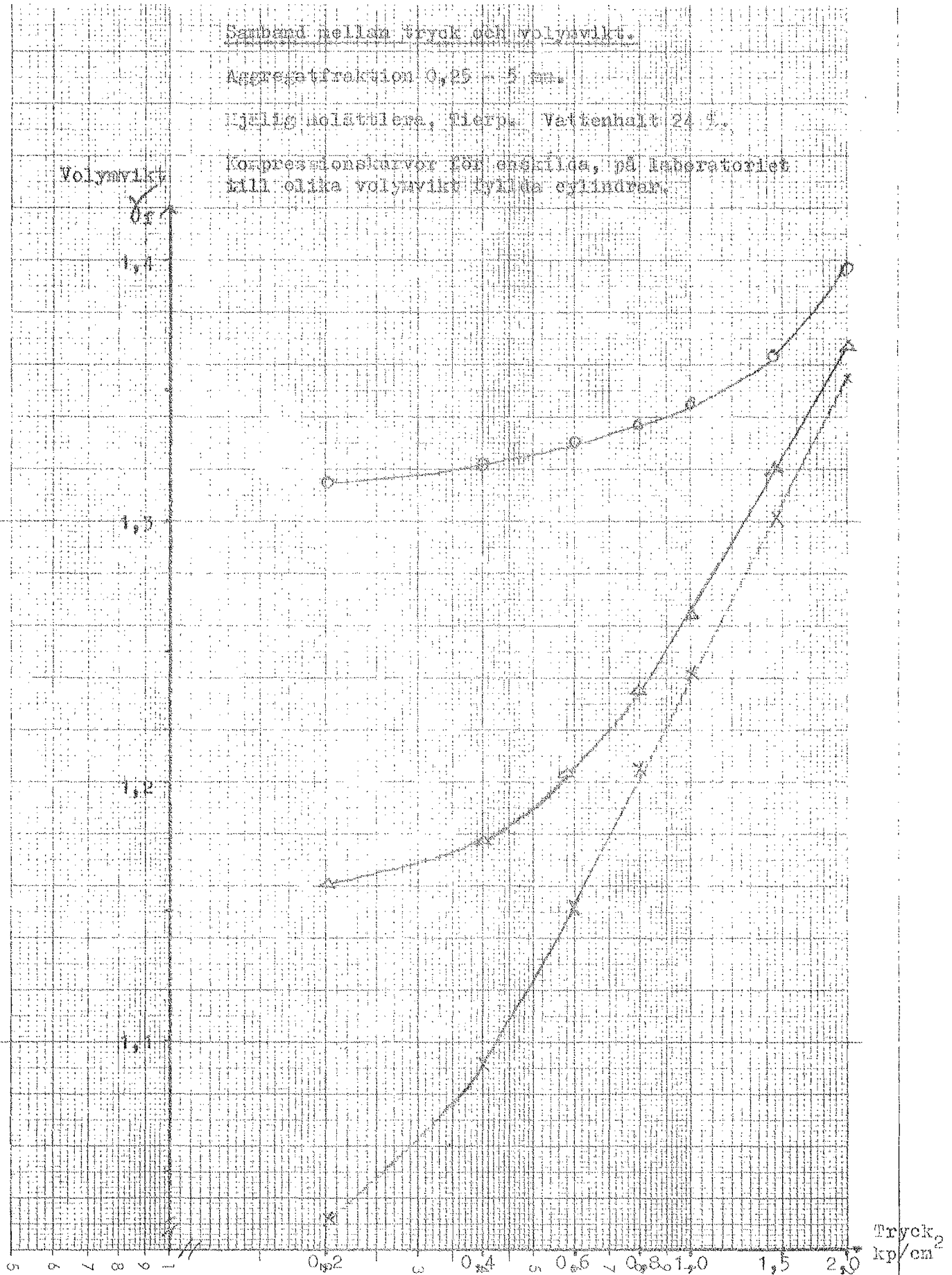


DIAGRAM 27.

191
303

Samband mellan tryck och volymvikt.

Aggregatfraktion 0,25 - 0,5 mm.

Hjällis molättlera, Tierp. Vattenhalt 21 %.

Kompressionskurvor för enskilda, på laboratoriet till olika volymvikt fyllda cylindrar.

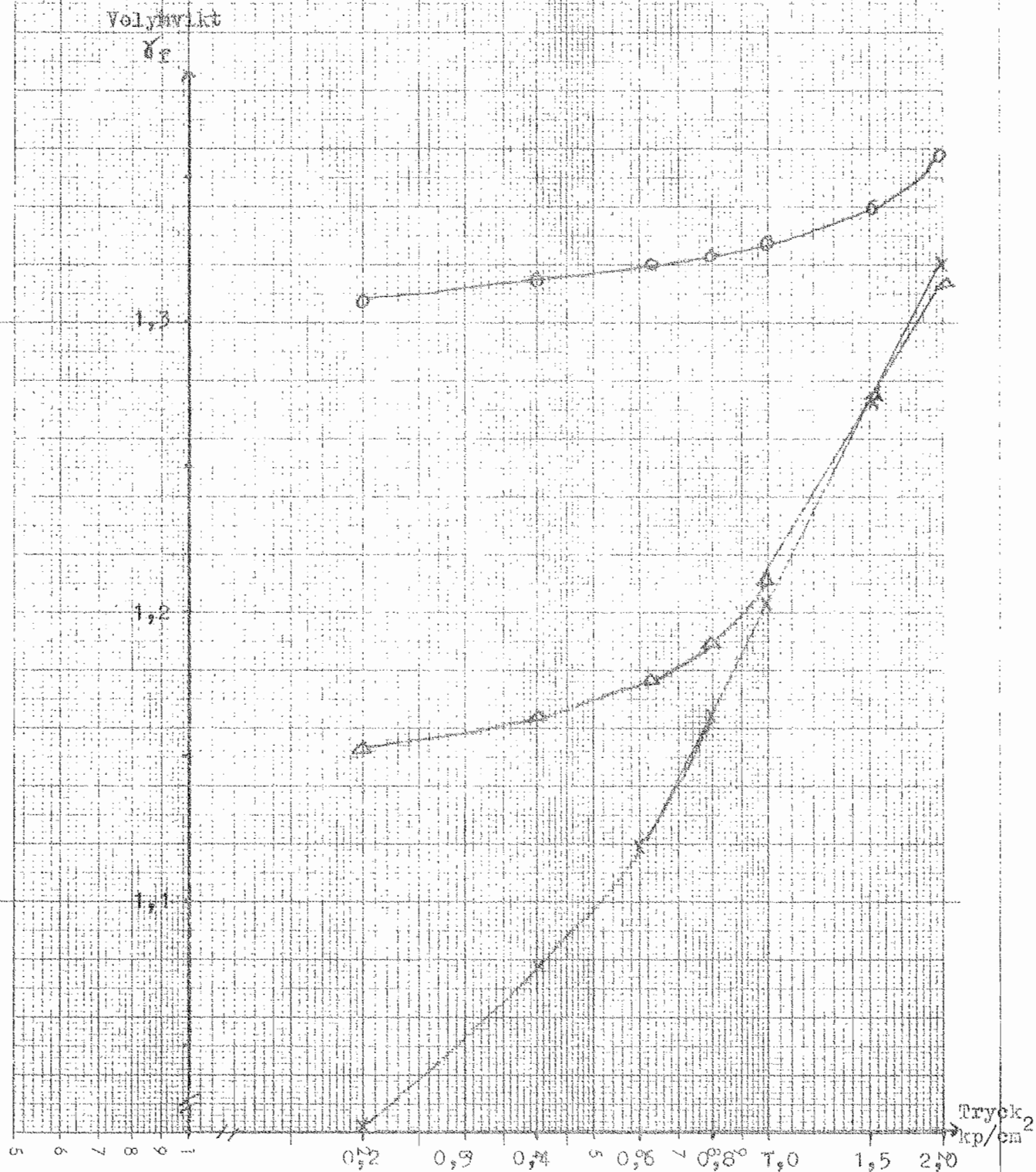


DIAGRAM 28.

194
3175

Samband mellan tryck och volymvikt.

Aggregatdiameter 0,25 + 0,02 mm.

Hjällig möbilstoffa, Tisco, fästenhalt 18 %.

Kompressionsprover för enskilda, på laboratoriet till
olika volymvikt fyllda cylindrar.

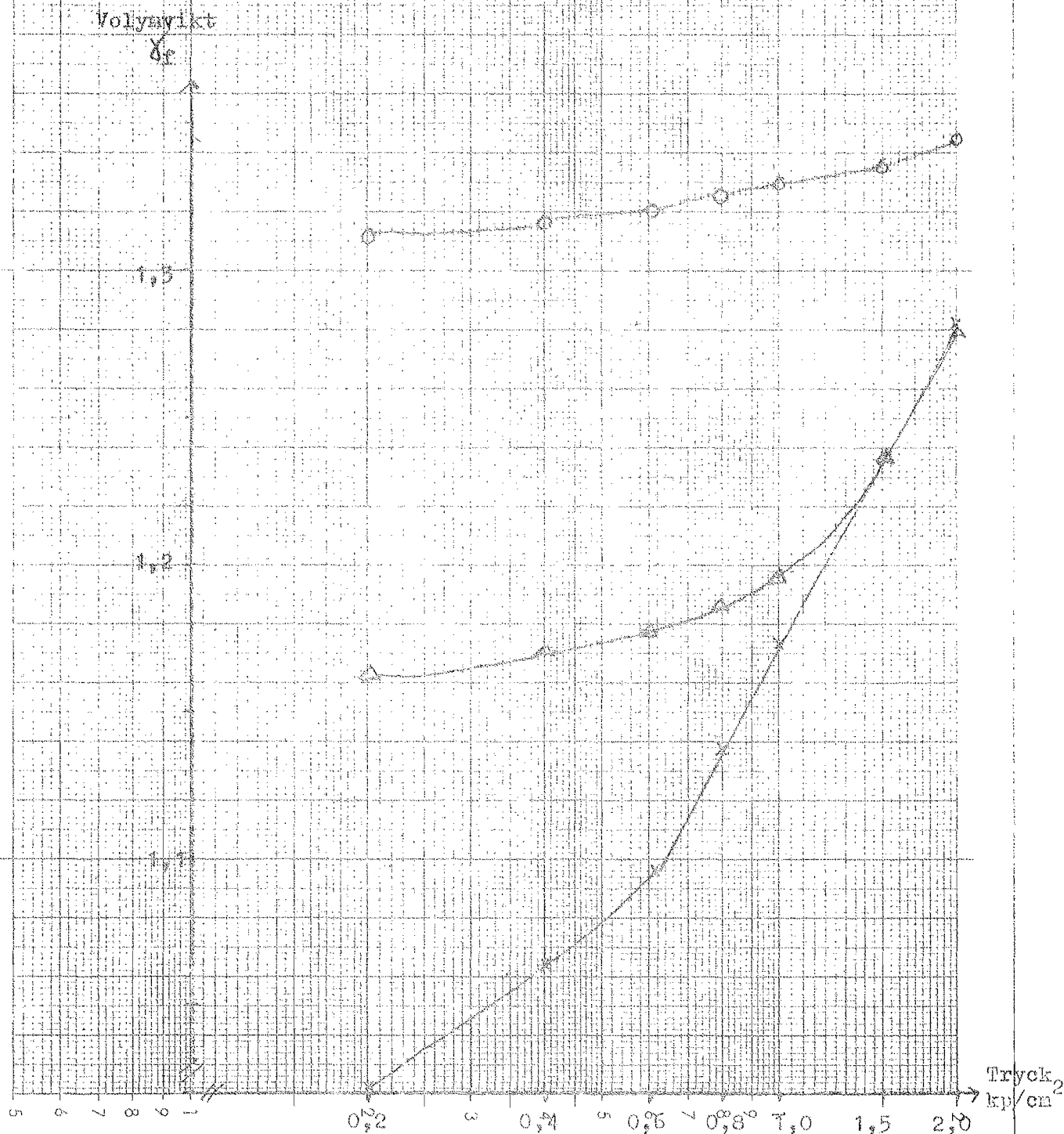


DIAGRAM 29.

Samband mellan tryck och volymvikt.

Provningsproppar från fältundersökningen, utvalda efter låg volymvikt.

Styv lera, Ica Sunnersta, nedre.

Volymvikt

Vattenhalt, %

28

28

28

26,5

24,5

1,4

1,3

1,2

1,1

21

Tryck
kp/cm²

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

1,10

DIAGRAM 20.

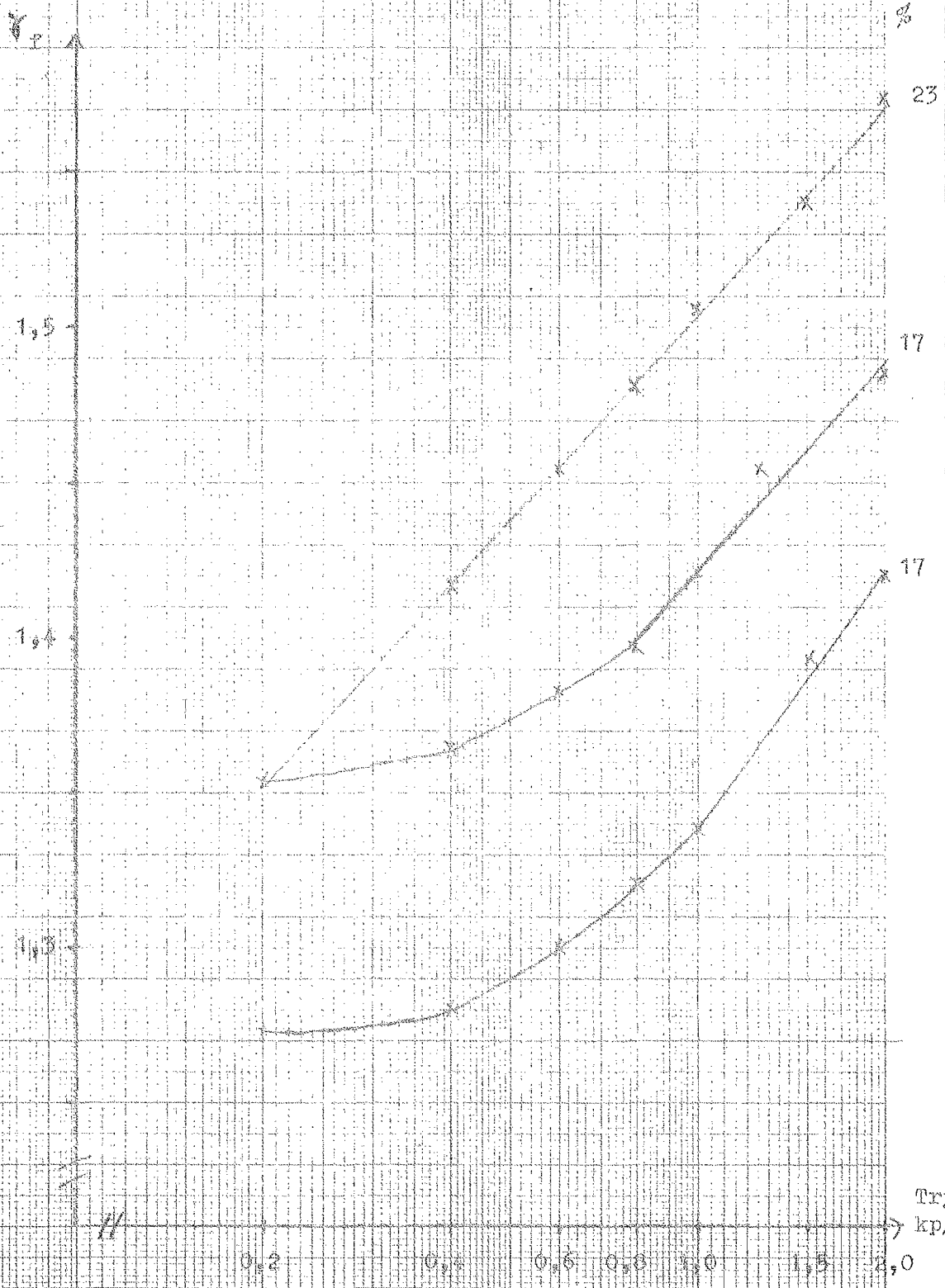
Samband mellan tryck och volyevikt.

Provproupar från fältundersökningen, utvalda efter låg volyevikt.

Lätt mullerlera, lrs. Sammensta övre.

Volyevikt

Vattenhalt %



Tryck₂
kp/cm²

DIAGRAM 31.

Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Provningsproppar från fältundersökningen, utvalda efter låg volymvikt.

Lerig mörk, Saby.

Volymvikt

γ_v

Vattenhalt

%

1,3

1,2

1,1

1,05

26

26

26

19

19

19

Tryck

kp/cm²

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

1,5

2,0

DIAGRAM 32.

Sambandet mellan tryck och volymvikt.

Provprouper från fältundersökningen, utvalda efter låg volymvikt.

Mjälling molattlera, Tierp

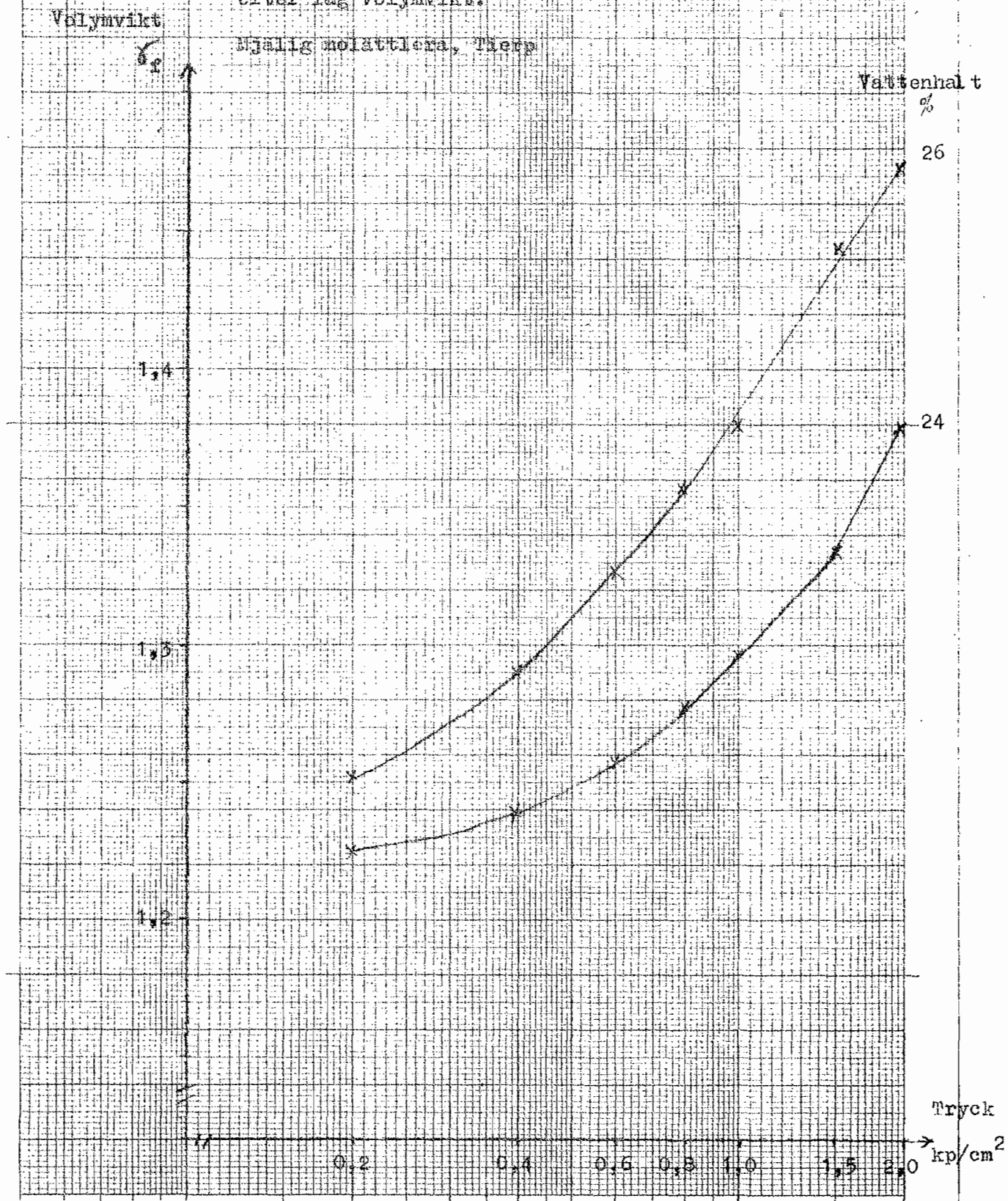


DIAGRAM 33.

Invertan av upprepade belastningar.
 Kompressionskurvor för 4, på lika sätt fyllda
 cylindrar. Kompression på följande sätt:
 Volymvikt
 0 - 2 kp/cm² utan avbrott
 " med 10 upprepade belastningar vid 0,5, 1,0
 resp. 2,0 kp/cm².

1,25

Belastning

nr

1,20

1,15

1,10

1,00

0,90

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

Fackning: denon
 ytterligare 9
 belastningar till
 samma tryck

0,2

0,5

1,0

1,5

2,0

Tryck,
 kp/cm²

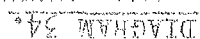
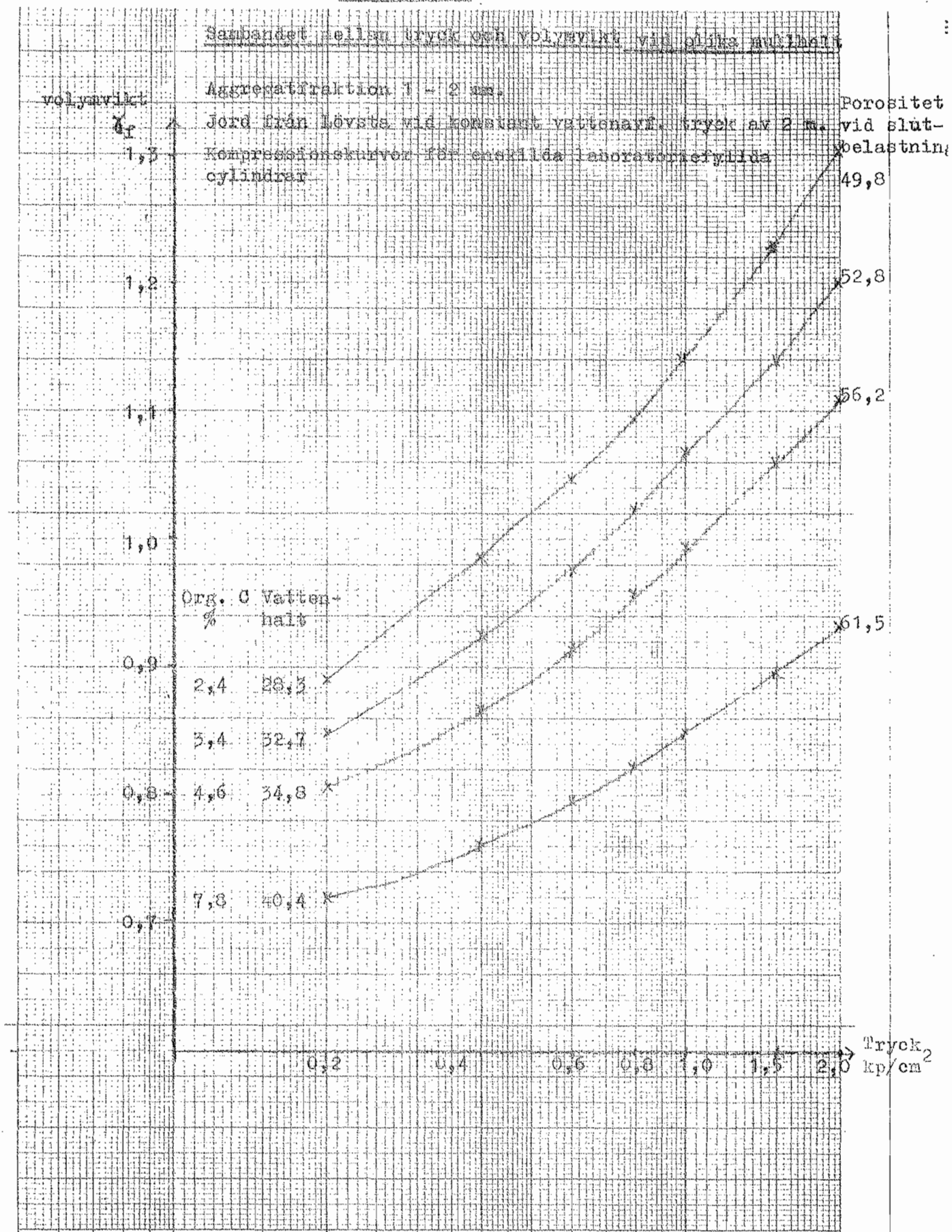


DIAGRAM 35.



Sambandet mellan tryck och volymvikt vid olika mallbalk.

Aggregatfraktion 1 - 2 mm.

Volymvikt

Jord från Lövsta vid konstant vattenhalt av 30,5 %.

Kompressionskurvor för enskilda laboratoriefyllda cylindrar.

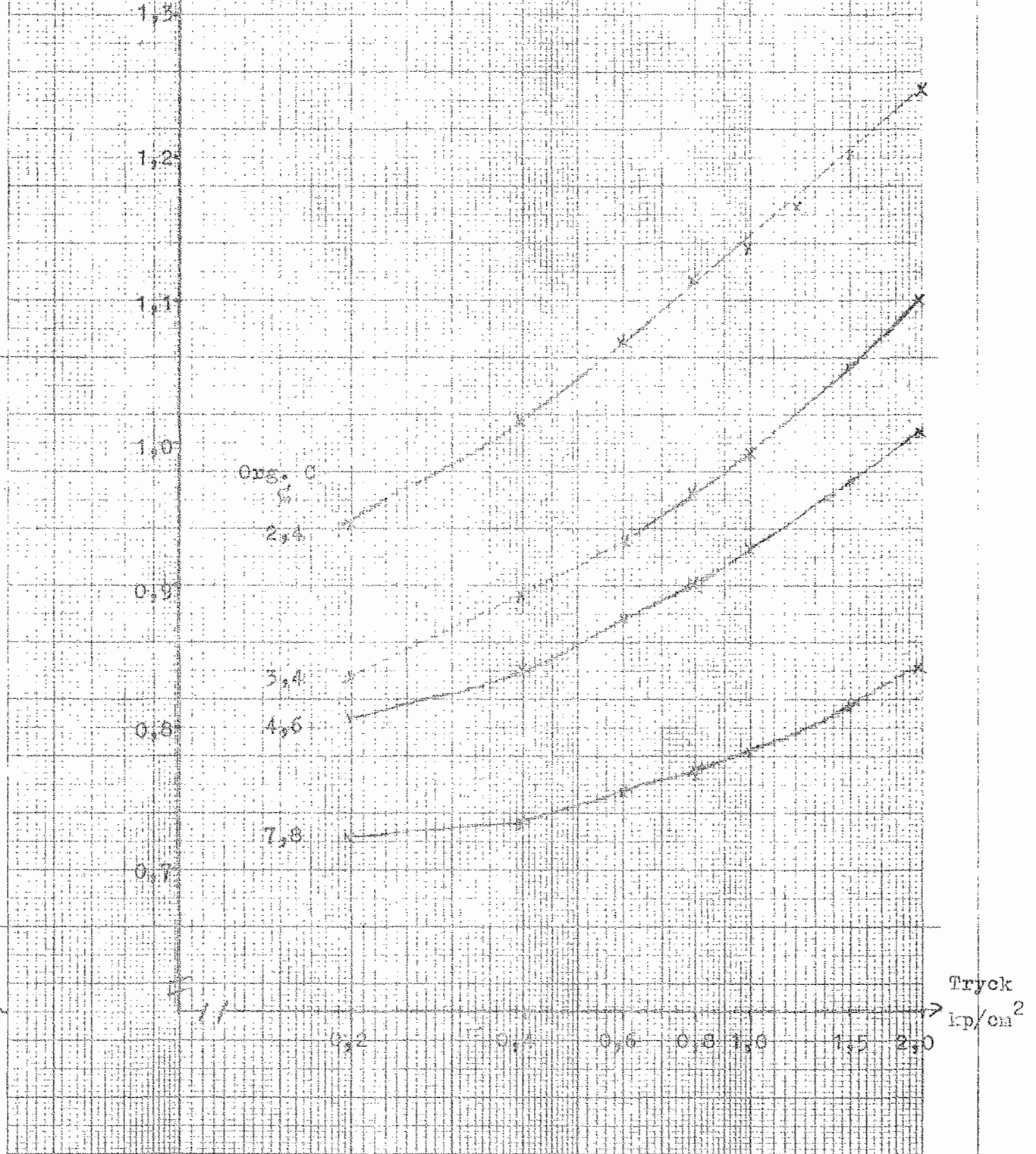


DIAGRAM 37.

Biologisk stabilisering.

Sarbandet mellan vattenhalt och volymvikt vid trycket
1 kp/cm² för olika omsättningsled.
6 cylindrar per omsättningsled.

